叶片泵CFD数值计算实例详解

董亮　刘厚林○编著





机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

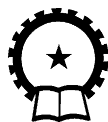


VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

叶片泵 CFD 数值计算实例详解

董 亮 刘厚林 编著



机 械 工 业 出 版 社

计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）技术的应用极大地改变了叶片泵水力设计和内流分析的现状。基于CFD技术的数值计算方法由于具有适应面广、成本低、计算精度高和速度快等优点，在叶片泵行业得到了越来越广泛的应用。在可预见的将来其应用范围还会得到进一步扩大。本书在简要介绍CFD理论的基础上，以目前国际上流行的三维造型软件、网格划分软件和求解软件为平台，通过大量的实例讲解，使读者能够很快地使用这些软件来进行叶片泵CFD数值计算。

本书共分5章：第1章介绍叶片泵计算流体动力学基础知识和常用的CFD数值计算软件；第2章介绍叶片泵三维建模的方法；第3章介绍叶片泵网格划分方法；第4章讲解叶片泵求解方法；第5章讲解后处理的方法。

本书适合广大科研工作者、工程师和在校学生等学习叶片泵CFD数值计算方法使用。

图书在版编目（CIP）数据

叶片泵CFD数值计算实例详解/董亮，刘厚林编著. —北京：机械工业出版社，2015.4

ISBN 978-7-111-49673-1

Ⅰ.①叶… Ⅱ.①董…②刘… Ⅲ.①叶片泵—计算流体力学—数值计算 Ⅳ.①TH31

中国版本图书馆CIP数据核字（2015）第076420号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号　邮政编码100037）
策划编辑：王春雨　责任编辑：王春雨
版式设计：赵颖喆　责任校对：刘怡丹
封面设计：陈　沛　责任印制：李　洋
北京华正印刷有限公司印刷
2015年5月第1版第1次印刷
184mm×260mm · 15.5印张 · 382千字
0001—2500册
标准书号：ISBN 978-7-111-49673-1
定价：58.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务
服务咨询热线：010-88361066
读者购书热线：010-68326294
　　　　　　　010-88379203
编 辑 热 线：010-88379782

网络服务
机 工 官 网：www.cmpbook.com
机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
金 书 网：www.golden-book.com
教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

前　　言

计算流体动力学（Computational Fluid Dynamics，CFD）技术的应用极大地改变了叶片泵水力设计和内流分析的现状。CFD 技术的发展和计算机技术的进步，已经把叶片泵的基本研究手段从以理论分析和物理模型试验为主的阶段发展到理论分析、物理试验与数值计算三者并重的新阶段。基于 CFD 技术的数值计算方法具有适应面广、成本低、计算精度高和速度快等优点，在叶片泵行业得到了越来越广泛的应用，且在可预见的将来其应用范围还会得到进一步扩大。本书在简要概述 CFD 理论的基础上，以目前国际上流行的三维造型软件 Pro/Engineer、网格划分软件 ICEM－CFD 和求解软件 ANSYS CFX 为基础，通过大量的实例讲解，使读者能够很快地掌握和使用这些软件来进行叶片泵 CFD 数值计算。读者根据书中的例子，按照书中的步骤一步一步地操作，即可学会和完成叶片泵的造型、网格划分、数值计算和后处理。本书按照 CFD 数值计算的流程编写而成，共分 5 章。

第 1 章介绍叶片泵计算流体动力学基础知识，讲解 CFD 数值计算的主要流程以及基本概念，介绍了常用的 CFD 数值计算软件。使读者可以轻松掌握计算流体动力学的基本概念，了解目前常用商用 CFD 软件及其特点。

第 2 章介绍使用 Pro/Engineer 进行叶片泵建模的方法，通过实例讲解离心泵叶轮、混流泵叶轮、轴流泵叶轮、蜗壳和导叶的水体建模方法以及建模技巧，使读者可以掌握叶片泵的建模方法。

第 3 章介绍使用 ICEM－CFD 进行叶片泵网格划分方法，通过实例讲解离心泵叶轮和蜗壳非结构化网格、混合网格以及结构网格的划分方法，使读者可以掌握叶片泵三大类型网格的划分方法。

第 4 章讲解了 ANSYS CFX 进行叶片泵数值计算方法，通过实例讲解离心泵导入网格、设置边界条件和指定湍流模型的方法，并讲解了定常数值计算、非定常数值计算、瞬态过程数值计算以及汽蚀计算过程，使读者可以掌握叶片泵数值计算方法。

第 5 章讲解了使用 CFX－Post 和 Tecplot 进行叶片泵数值计算后处理的方法，通过实例讲解叶片泵外特性的计算方法、数值计算结果导入、创建云图、矢量图以及流线图等对象的方法，使读者可以掌握叶片泵的后处理方法。

本书适合包括广大科研工作者、工程师和在校学生等在内的初学者学习叶

片泵 CFD 数值计算方法使用，亦可作为高等院校流体机械及工程专业的教材。

本书的撰写得到了江苏大学流体机械工程技术研究中心和国家水泵及系统工程技术研究中心领导和同事的大力支持。本书由董亮、刘厚林编著，谈明高、王勇、王凯、吴贤芳、白羽、丁剑、戴涵葳、丁荣、刘明明、周孝华、王文博、蒋玲林、黄浩钦、舒敏骅、任芸等为本书的编写提供了大量的帮助，在此一并表示感谢。

虽然作者在本书的编写过程中力求叙述准确，但由于水平有限，书中欠妥之处在所难免，希望广大读者指正。读者在学习过程中遇到与本书有关的问题，可以发送电子邮件到邮箱 liuhoulin@ ujs. edu. cn，作者会尽快给予解答。

董　亮　刘厚林

目　　录

前言
第 1 章　计算流体动力学基础 …………………… 1
1.1　CFD 简介 …………………………………… 1
1.2　三维造型软件 ……………………………… 1
1.2.1　Pro/Engineer 简介 ……………………… 1
1.2.2　Unigraphics NX 简介 …………………… 2
1.2.3　SolidWorks 简介 ………………………… 2
1.3　网格生成软件 ……………………………… 2
1.3.1　ICEM-CFD 简介 ………………………… 2
1.3.2　Gambit 简介 ……………………………… 3
1.3.3　Gridgen 简介 …………………………… 3
1.4　CFD 求解软件 ……………………………… 3
1.4.1　ANSYS CFX 简介 ………………………… 3
1.4.2　Fluent 简介 ……………………………… 4
1.4.3　Star-CD 简介 …………………………… 4
1.5　CFD 后处理软件 …………………………… 4
1.5.1　Tecplot 简介 ……………………………… 4
1.5.2　EnSight 简介 …………………………… 5
1.6　网格生成技术基础 ………………………… 5
1.6.1　非结构化网格 …………………………… 5
1.6.2　混合网格 ………………………………… 6
1.6.3　结构化网格 ……………………………… 7
1.6.4　特殊的网格生成方法 …………………… 9
1.7　CFD 数值计算技术基础 …………………… 10
1.7.1　控制方程 ………………………………… 10
1.7.2　湍流模型 ………………………………… 11
1.7.3　离散方法 ………………………………… 22
1.7.4　数值算法 ………………………………… 22
第 2 章　叶片泵三维造型及实例 ……………… 26
2.1　Pro/Engineer 基本操作 …………………… 26
2.1.1　创建与保存文件 ………………………… 26
2.1.2　草绘 ……………………………………… 27
2.1.3　创建基准 ………………………………… 27
2.1.4　创建样条曲线 …………………………… 30
2.1.5　边界混合特征 …………………………… 30
2.1.6　拉伸特征 ………………………………… 32
2.1.7　旋转特征 ………………………………… 33
2.1.8　倒圆角特征 ……………………………… 34
2.1.9　阵列特征 ………………………………… 35
2.2　离心泵造型 ………………………………… 36
2.2.1　叶轮水体造型 …………………………… 36
2.2.2　蜗壳造型 ………………………………… 54
2.2.3　进出口延长段造型 ……………………… 74
2.2.4　模型装配 ………………………………… 75
2.3　轴流泵叶轮造型 …………………………… 81
2.4　混流泵叶轮造型 …………………………… 90
2.5　空间导叶水体的绘制 ……………………… 103
第 3 章　叶片泵网格生成及实例 ……………… 111
3.1　离心泵非结构化网格划分 ………………… 111
3.1.1　叶轮非结构化网格划分 ………………… 111
3.1.2　蜗壳非结构化网格生成 ………………… 123
3.1.3　进出口延长段非结构化网格生成 ……… 128
3.1.4　组合 ……………………………………… 128
3.2　离心泵混合网格划分 ……………………… 128
3.2.1　叶轮混合网格划分 ……………………… 128
3.2.2　蜗壳混合网格生成 ……………………… 133
3.2.3　进出口延长段混合网格生成 …………… 138
3.3　离心泵结构化网格划分 …………………… 139
3.1.1　叶轮结构化网格划分 …………………… 139
3.3.2　蜗壳结构化网格划分 …………………… 165
3.3.3　进出口延长段结构化网格划分 ………… 176
第 4 章　数值计算及实例 ……………………… 186
4.1　叶片泵定常计算 …………………………… 186
4.2　叶片泵非定常计算 ………………………… 199
4.3　叶片泵汽蚀计算 …………………………… 202
4.4　叶片泵过渡过程计算 ……………………… 205
第 5 章　CFD 数值计算后处理 ………………… 209

5. 1　叶片泵外特性计算方法 …………… 209
5. 1. 1　扬程计算 …………………………… 210
5. 1. 2　效率计算 …………………………… 210
5. 1. 3　汽蚀余量计算 ……………………… 211
5. 1. 4　CFX 函数开发 ……………………… 211
5. 2　CFX-Post 后处理 …………………… 215
5. 2. 1　导入结果文件并创建切平面 ……… 215
5. 2. 2　创建压力云图与等值线图 ………… 218
5. 2. 3　创建速度矢量图 …………………… 220
5. 3　Tecplot 简介 ………………………… 222
5. 3. 1　菜单栏 ……………………………… 222
5. 3. 2　工具栏 ……………………………… 226
5. 3. 3　边框工具栏 ………………………… 226
5. 3. 4　状态栏 ……………………………… 227
5. 3. 5　工作区 ……………………………… 227
5. 4　Tecplot 的实例应用 ………………… 227
5. 4. 1　绘制矢量图 ………………………… 228
5. 4. 2　绘制等值线图 ……………………… 231
参考文献 …………………………………… 237

第1章 计算流体动力学基础

本章主要介绍计算流体动力学的一些重要的基础知识，并对 CFD 计算流程做一简单讲解。此外，本章还介绍了一些 CFD 计算过程中常用软件以及这些软件的优缺点，读者可以根据自己情况选读。本书针对叶片泵的特点以及相关软件的应用范围，虽仅对 Pro/Engineer、ICEM、CFX、CFX-Post 以及 Tecplot 在叶片泵中的使用方法进行讲解，但对其他类型旋转机械和相关软件的使用都有很好的借鉴作用。

1.1 CFD 简介

计算流体动力学是通过计算机数值计算和图像显示，对包含有流体流动和热传导等物理现象进行分析。CFD 数值计算的基本思想可表述为：把原来在时间域及空间域上连续物理量的场（如压力场、速度场）用一系列有限离散点变量值的集合来代替，通过一定的原则和方式建立起来关于这些离散点场变量之间关系的代数方程组，然后求解该代数方程组获得变量的近似值。

利用 CFD 数值计算方法可以对叶片泵进行优化设计，得到性能更加优良的水泵模型。此外，通过 CFD 技术进行三维数值计算，不仅能在模型设计阶段对叶片泵的外特性进行预测而且还能预测其内部流动的不稳定结构，如漩涡、二次流等。因此，在模型设计阶段就能消除可能发生的故障和隐患。

CFD 数值计算的流程如图 1-1 所示。三维造型就是将叶片泵中的所有水体部分（包括进水管、叶轮、压水室以及出水管等）进行三维建模；网格划分是指将叶片泵的水体部分进行空间离散，使其被划分成多个控制方程能够求解的单元；CFD 求解是指在选择合适湍流模型、边界条件、速度压力耦合算法的基础上，给定计算收敛条件进行 CFD 数值计算；后处理是指获得叶片泵的扬程、功率、效率等能量特性，以及叶片泵内部的速度矢量、压力云图等内流状态。

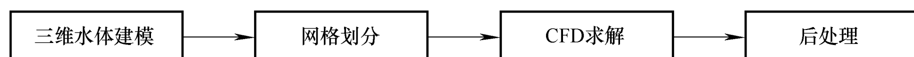


图 1-1 CFD 数值计算流程图

1.2 三维造型软件

1.2.1 Pro/Engineer 简介

Pro/Engineer（简称 Pro/E）软件是美国参数技术公司（PTC）旗下的 CAD/CAM/CAE

一体化的三维软件。Pro/E 第一个提出了参数化设计的概念，并且采用了单一数据库来解决特征的相关性问题，这种设计概念改变了机械 CAD/CAM/CAE 的传统观念，它已经成为当今世界 CAD/CAM/CAE 领域的新标准。通过采用模块化设计方式，用户可以根据自身的需要选择相应功能，可以分别进行草图绘制、零件制作、装配设计、钣金设计、加工处理等。Pro/E共有 26 个系统功能模块，除了比较常用的三维造型工具外，还包括反向设计、有限元分析、模具设计、数控加工、后置处理等。经过二十多年的发展，目前 Pro/E 广泛应用于机械设计加工、模具设计制造、电子制造和通信设备的设计制造、工业设计以及航空航天等行业。Pro/E 是一个全方位的 3D 产品开发软件，将产品的设计及装配、模具开发、工程图制作、数控加工和结构分析等功能整合于一身。在设计过程中，模型的所有尺寸均可以视为可变参数，通过修改这些参数值，相关的实体模型即会按照尺寸变化重新生成新的实体模型。

1.2.2　Unigraphics NX 简介

Unigraphics NX（简称 UG ）是 Siemens PLM Software 公司开发的一个产品工程解决方案，它为用户的产品设计及加工过程提供了数字化造型和验证手段。UG 是一个交互式 CAD/CAM（计算机辅助设计与计算机辅助制造）系统，它功能强大，可以轻松实现各种复杂实体及造型的建构。UG 在诞生之初主要基于工作站，但随着 PC 硬件的发展和个人用户的迅速增长，在 PC 上的应用取得了迅猛的增长，已经成为模具行业三维设计的一个主流应用。利用 UG 建模，工业设计师能够迅速地建立和改进复杂的产品形状，并且使用先进的渲染和可视化工具来最大限度地满足设计概念的审美要求。UG 具有高性能的机械设计和制图功能，为制造设计提供了高性能和灵活性，以满足客户设计任何复杂产品的需要。UG 优于通用的设计工具，具有专业的管路和线路设计系统、钣金模块、专用塑料件设计模块和其他行业设计所需的专业应用程序。

1.2.3　SolidWorks 简介

SolidWorks 软件功能强大，组件繁多。SolidWorks 具有功能强大、易学易用和技术创新三大特点，这使得 SolidWorks 成为领先的、主流的三维 CAD 解决方案。SolidWorks 能够提供不同的设计方案、减少设计过程中的错误以及提高产品质量。SolidWorks 不仅提供强大的功能，而且对每个工程师和设计者来说，操作简单方便、易学易用。

1.3　网格生成软件

1.3.1　ICEM-CFD 简介

作为专业的前处理软件，ICEM-CFD 为所有世界流行的 CAE 软件提供高效可靠的分析模型。它拥有强大的 CAD 模型修复能力、自动中面抽取、独特的网格“雕塑”技术、网格编辑技术以及广泛的求解器支持能力。ICEM 作为 Fluent 和 CFX 标配的网格划分软件，逐渐取代了 GAMBIT 的地位。ANSYS ICEM CFD 中六面体网格划分采用了由顶至下的“雕塑”方式，可以生成多重拓扑块的结构和非结构化网格。整个过程半自动化，使用户能在短时间内掌握原本只能由专家进行的操作。采用了先进的 O-Grid 等技术，用户可以方便地在

ICEM-CFD 中对非规则几何形状划出高质量的“O”形、“C”形、“L”形六面体网格。ICEM 能快速自动生成六面体为主的网格，自动检查网格质量，自动进行整体平滑处理，坏单元自动重划，可视化修改网格质量。

1.3.2　Gambit 简介

Gambit 是面向 CFD 的前处理器软件，包含全面的几何建模能力和功能强大的网格划分工具，可以划分出包含边界层等 CFD 特殊要求的高质量的网格。Gambit 可以生成 FLUENT5、FLUENT4.5、FIDAP、POLYFLOW 等求解器所需要的网格。Gambit 软件将功能强大的几何建模能力和灵活易用的网格生成技术集成在一起。使用 Gambit 软件，将大大减小 CFD 应用过程中，建立几何模型和划分网格所需要的时间。用户可以直接使用 Gambit 软件建立复杂的实体模型，也可以从主流的 CAD/CAE 系统中直接读入数据。Gambit 软件高度自动化，所生成的网格既可以是非结构化的，也可以是多种类型组成的混合网格。

1.3.3　Gridgen 简介

Gridgen 是 Pointwise 公司的旗舰产品。Gridgen 是专业的网格生成器，被工程师和科学家用于生成 CFD 网格。它可以生成高精度的网格以使得分析结果更加准确，同时它还可以分析并不完美的 CAD 模型，且不需要人工清理模型。Gridgen 可以生成多块结构网格、非结构化网格和混合网格，也可以导入 CAD 的输出文件作为网格生成模型。生成的网格可以输出十几种常用商业流体软件的数据格式，在商业流体软件中可以直接使用。对用户自编的 CFD 软件，可选用公开格式（Generic），如结构化网格的 PLOT3D 格式。Gridgen 网格生成主要分为传统法和各种新网格生成方法。传统方法的思路是由线到面、由面到体的装配式生成方法。各种新网格生成法，如推进方式可以高速地由线推出面，由面推出体。另外还采用了转动、平移、缩放、复制、投影等多种技术，可以说各种现代网格生成技术都能在 Gridgen 找到。

1.4　CFD 求解软件

1.4.1　ANSYS CFX 简介

ANSYS CFX 是一款高端的、通用的流体动力学软件，在过去 20 年来已经广泛地被用于解决流动问题。ANSYS CFX 的核心是其先进的求解技术，这是快速、稳健地获得可靠精确结果的关键。现代化的、高度并行的求解器是大量物理模型的基础，这些物理模型能虚拟地捕捉任意和流动相关的现象。该求解器及其丰富的物理模型被包装为一个现代、直观、灵活的用户界面，并可以用对话文件、脚本和强大的表达式语言进行订制。CFX 主要是做泵、水轮机、风机等流体机械的数值模拟，可以做稳态和瞬态的模拟，而且能够较好地保证计算的精度。

ANSYS CFX 是全世界第一套使用全隐式多网格耦合求解技术的商业化软件，随后几乎所有的商业化 CFD 软件开始发展这种新一代求解技术。该技术以数十倍的量级提高计算速度和稳定性，并以并行处理的模式进行运算，极大提高了 CFD 求解效率。ANSYS CFX 使用基于有限元的有限体积法，获得较传统方法更精确的微元离散化，并采用基于物理规律的高

阶差分格式，这两个特点使 ANSYS CFX 即使在较粗的网格上也可获得准确的结果。

1.4.2　Fluent 简介

Fluent 是目前国际上比较流行的商用 CFD 软件包，在美国的市场占有率为 60%，凡是和流体、热传递和化学反应等有关的行业均可使用。它具有丰富的物理模型、先进的数值方法和强大的前后处理功能，在航空航天、汽车设计、石油天然气和涡轮机设计等方面都有着广泛的应用。Fluent 软件采用基于完全非结构化网格的有限体积法，并具有基于网格节点和网格单元的梯度算法；Fluent 软件能够进行定常/非定常流动模拟。

Fluent 软件中的动/变形网格技术主要解决边界运动的问题，用户只需指定初始网格和运动壁面的边界条件，余下的网格变化完全由解算器自动生成。网格变形方式有三种：弹簧压缩式、动态铺层式以及局部网格重生式。其局部网格重生式是 Fluent 所独有的，而且用途广泛，可用于非结构化网格、变形较大问题以及物体运动规律事先不知道而完全由流动所产生的力决定的问题。Fluent 软件具有强大的网格支持能力，支持界面不连续的网格、混合网格、动/变形网格以及滑动网格等。值得强调的是，Fluent 软件还拥有多种基于解的网格的自适应、动态自适应技术以及动网格与网格动态自适应相结合的技术。Fluent 软件包含三种算法：非耦合隐式算法、耦合显式算法和耦合隐式算法，是商用软件中最多的。Fluent 软件包含丰富而先进的物理模型，使得用户能够精确地模拟无粘流、层流、湍流。湍流模型包含 Spalart-Allmaras 模型、k-ω 模型组、k-ε 模型组、雷诺应力模型（RSM）组、大涡模拟模型（LES）组以及最新的分离涡模拟（DES）和 V2F 模型等。

1.4.3　Star-CD 简介

Star-CD 是 Computational Dynamics 公司开发出来的全球第一个采用完全非结构化网格生成技术和有限体积方法来研究工业领域中复杂流动的流体分析商用软件包。网格生成工具软件包 Proam 软件利用“单元修整”核心技术，使得各种复杂形状几何体能够简单快速地生成网格。CD 公司还开发了各种特殊用途的网格生成工具软件：用于发动机内部热分析的 Es-ice 软件、汽车空气动力学分析 Es-aero 软件等 Es 系列软件、用于曲面分析、非结构化网格生成的专业软件 ICEM CFD Tetra、适用于涡轮机械流体分析的旋转体网格自动生成工具软件 TIGER 以及用于搅拌器内流体分析的专业网格生成软件 Mixpert。

Star-CD 的解析对象涵盖基础热流解析、导热、对流、辐射（包含太阳辐射）热问题，多相流问题，化学反应/燃烧问题，旋转机械问题，流动噪声问题等。在最新发布的 V4 版本中，Star-CD 更是将解析对象扩展到流体/应力问题，电磁场问题和铸造领域。作为最早引入非结构化网格概念的软件，Star-CD 保持了对复杂结构流域解析的优势，其最新的基于连续介质力学求解器具有内存占用少、收敛性强、稳定性好的特点，受到全球用户的好评。

1.5　CFD 后处理软件

1.5.1　Tecplot 简介

Tecplot 系列软件是由美国 Tecplot 公司推出的功能强大的数据分析和可视化处理软件。

它包含数值模拟和 CFD 结果可视化软件 Tecplot 360、工程绘图软件 Tecplot Focus 以及油藏数值模拟可视化分析软件 Tecplot RS。它提供了丰富的绘图格式，包括 X-Y 曲线图、多种格式的 2-D 和 3-D 面绘图以及 3-D 体绘图格式，而且软件易学易用，界面友好。同时，针对于 Fluent 软件有专门的数据接口，可以直接读入 *. cas 和 *. dat 文件，也可以在 Fluent 软件中选择输出的面和变量，然后直接输出 Tecplot 格式文档。

Tecplot 360 是一款将工程绘图与先进的数据可视化功能结合为一体的数值模拟和 CFD 可视化软件。它能按照设计人员的设想迅速地根据数据绘图及生成动画，对复杂数据进行分析，进行多种布局安排，并能将计算结果与专业的图像和动画联系起来。

1.5.2　EnSight 简介

EnSight（Engineering Insight）由美国 CEI 公司研发，是一款尖端的科学工程可视化与后处理软件，拥有强大的功能。基于图标的用户接口易于掌握，并且能够很方便地移动到新增功能层中。EnSight 能在所有主流计算机平台上运行，支持大多数主流 CAE 程序接口和数据格式。EnSight 是为了在各种环境下高效处理数据而设计，并且在远程或本地处理瞬态或稳态数据方面性能卓越。EnSight 支持各种类型的结构化或非结构化数据，包括多面体元素，甚至还能导入测量或模拟粒子轨迹。另外，通过分布式存储并行处理的数据集大小几乎不受限制。可以从包括计算流体动力学软件、有限元分析软件、碰撞软件、多体动力学软件和计算机辅助设计软件中导入数据。同时，EnSight 一次最多可以加载 16 个算例，这些案例可以是任何格式，并采用 CAD 模型显示计算结果，还可以并排比较多个运行结果。

1.6　网格生成技术基础

计算流体动力学中，按一定规律分布于流场中离散点的集合叫网格（Grid），产生这些节点的过程称为网格生成（Grid Generation）。网格生成是连接几何模型和数值算法的纽带，几何模型只有被划分成一定标准的网格时才能对其进行数值求解。一般而言，网格划分越密，得到的结果就越精确，但耗时也越多。数值计算结果的精度及效率主要取决于网格及划分时所采用的算法[1]，它和控制方程的求解是数值模拟中最重要的两个环节。网格生成技术已经发展成为流体机械 CFD 的一个重要分支。现有的网格生成方法主要分为结构化网格、非结构化网格和混合网格三大类。

1.6.1　非结构化网格

非结构化网格技术主要弥补了结构化网格不能解决任意形状和任意连通区域网格划分的缺陷。在这种网格中，单元与节点的编号无固定规则可遵循，而且每一个节点的邻点个数也不是固定不变的。因此，非结构化网格中节点和单元的分布可控性好，能够较好地处理边界，适用于流体机械中复杂结构模型网格的生成。非结构化网格生成方法在其生成过程中采用一定的准则进行优化判断，因而能生成高质量的网格，很容易控制网格大小和节点密度，它采用的随机数据结构有利于进行网格自适应，提高计算精度。非结构化网格方法有两个缺点：一是不能很好地处理黏性问题，二是对于相同的物理空间，网格填充效率不高。非结构化网格生成方法主要分为以下几种。

1. 阵面推进法

阵面推进法（Advancing Front Method，AFT）[2]的思想最早由 A. George 于 1971 年提出，目前经典的阵面推进技术是由 Lo[3]和 Lohner[4]等人提出的。阵面推进法的基本思想是首先将待离散区域的边界按需要的网格尺度分布划分成小阵元（二维是线段，三维是三角形面片），构成封闭的初始阵面，然后从某一阵元开始，在其面向流场的一侧插入新点或在现有阵面上找到一个合适点与该阵元连成三角形单元，就形成了新的阵元。将新阵元加入到阵面中，同时删除被掩盖了的旧阵元，依次类推，直到阵面中不存在阵元时推进过程结束。其优点是初始阵面即为物面，能够严格保证边界的完整性；计算截断误差小，网格易生成；引入新点后易于控制网格步长分布且在流场的大部分区域也能得到高质量的网格。缺点是每推进一步，仅生成一个单元，因此效率较低。

2. Delaunay 三角划分

Delaunay 三角划分方法[5]是在 19 世纪 50 年代 Dirichlet 提出 Voronoi 图的基础上发展而来的，是目前应用最广泛的网格生成方法之一。Delaunay 三角形划分的步骤是：将平面上一组给定点中的若干个点连接成 Delaunay 三角形，即每个三角形的顶点都不包含在任何其他不包含该点三角形的外接圆内，然后在给定的这组点中取出任何一个未被连接的点，判断该点位于哪些 Delaunay 三角形的外接圆内，连接这些三角形的顶点组成新的 Delaunay 三角形，直到所有的点全部被连接。Delaunay 三角划分的优点是具有良好的数学支持，生成效率高，不易引起网格空间穿透，数据结构相对简单；缺点是为了要保证边界的一致性和物面的完整性需要在物面处进行布点控制，以避免物面穿透。

3. 四叉树（2D）/八叉树（3D）方法

Yerry 和 Shephard[6,7]于 1983 年首次将四/八叉树法的空间分解法引入到网格划分领域，形成了著名的四叉树/八叉树方法。其后许多学者对该方法进行了完善和发展，提出了修正的四叉树/八叉树方法[8]。修正的四叉树/八叉树方法生成非结构网格的基本做法是：先用一个较粗的矩形（二维）/立方体（三维）网格覆盖包含物体的整个计算域，然后按照网格尺度的要求不断细分矩形/立方体，使符合预先设置疏密要求的矩形/立方体覆盖整个流场，最后再将矩形/立方体切割成三角形/四面体单元。该方法的优点是网格生成速度快且易于自适应，还可以方便地同实体造型技术相结合；缺点是由于其基本思想是“逼近边界”，复杂边界的逼近效果不甚理想，所以生成的网格质量较差。

4. 阵面推进法和 Delaunay 三角划分结合算法

阵面推进法生成的网格具有质量好、边界完整性好的特点；而 Delaunay 三角划分法生成网格具有高效率和良好数学支持的特点。在 1993 年 Rebay[9]首次提出这两种网格生成方法结合之前，它们一直是作为“竞争对手”来进行描述的，此方法一提出，就立刻吸引了众多学者对该方法进行研究，并提出了许多改进的方法[10]。该算法的实施过程为：从边界网格出发，内部的点通过阵面推进法来生成，然后利用 Delaunay 算法对这些点进行逐点插入，重复以上过程直到网格的尺寸达到要求尺寸。其优点是网格的质量好，边界逼近效果好，网格生成效率高，有良好的数学支持；主要缺点是对于边界网格的依赖性较大，边界网格的质量直接影响网格划分的结果。

1.6.2 混合网格

近年来，结合结构化网格和非结构化网格优势的混合网格技术受到 CFD 工作者的普遍

重视。混合网格具有划分灵活、易于实现网格自适应等优点，适于处理复杂边界问题，因此被广泛地应用。混合网格主要有以下几种。

1. 三棱柱/四面体网格

这类网格的生成分为两部分：靠近物面区域三棱柱网格的生成及其他区域四面体网格的生成。三棱柱网格是采用代数的方法生成的，基本过程是把物体按一定的方式进行放大而得到放大物面，与原物面联立求出两组物面上每个点的矢量方向，把对应的两个点用三次曲线进行拟合，得到拟合曲线，截取该曲线，从而得到三棱柱网格[11]。四面体网格是采用 Delaunay 方法生成的，生成步骤为：首先找到三棱柱的最外层网格点，形成覆盖整个计算域的最初始的网格，然后采用 Delaunay 法进行网格划分并删除不必要的网格，从而形成新的四面体网格。该方法的优点是：对于复杂外形的表面网格和空间网格生成较容易，并且极大地减少了计算存储量。

2. 针对多部件或多体复杂外形的混合网格

该类网格是先对多体问题的每一单体或复杂外形的每一部件生成贴体结构网格，在体与体、部件与部件之间的交界区挖出一个洞（Hole），洞内由非结构化网格来填充。这类混合网格的代表有“拉链”网格（Zipper Grids）[12]和“龙型”网格（Dragon Grids）[13]等。

3. 矩形/非结构化混合的网格

矩形网格[14]在 CFD 计算中最早使用，因为矩形网格不仅易于生成而且不必进行 Jacobian 矩阵的计算，比贴体网格更简单、更快捷。但是它不能处理复杂曲面边界，处理不好就会出现“台阶效应”[15]。而非结构化网格却有模拟复杂外形的优势，在物面附近采用非结构化网格可以消除“台阶效应”，同时达到模拟复杂外形的目的。因此将两者结合起来必能充分发挥它们各自的特长，这样一方面可以提高网格生成和流场计算的效率，另一方面可以处理复杂外形绕流问题，这就形成了矩形/非结构化混合网格。为了计算黏性问题，亦可在物面附近采用结构（二维）或半结构（三维）网格，然后由非结构化网格过渡到外场的矩形网格，由此构成混合网格。

1.6.3　结构化网格

结构化网格的优点是节点与邻点关系可以依据网格编号的规律而自动得出；很容易地实现区域的边界拟合；结构化网格的缺点是适用的范围比较窄，只适用于形状规则的图形。结构化网格主要分为正交曲线坐标系中常规网格[16]、对角直角坐标法[17]、适体坐标法（Body-Fitted Coordinate，BFC）和块结构化网格。前两种方法是网格生成技术中最基本、最简单的网格生成方法，在此不再赘述，本书重点介绍 BFC 和块结构化网格生成方法。

1. BFC 网格生成方法

BFC 网格生成方法可以看作是一种坐标变换，即把物理平面上的不规则区域变换成计算平面上的规则区域，使计算平面的点与物理平面的点建立一一对应关系，从而满足数值求解的需要。BFC 网格生成方法主要分为以下几类：

（1）保角变换法（复变函数法）

保角变换法[18]是将二维不规则区域利用保角变换理论变换成矩形区域，并通过矩形区域上的直角坐标网格构造二维不规则区域贴体网格。它的优点是能精确地保证网格的正交性，网格光滑性较好，在二维翼型计算中有广泛应用；缺点是对于比较复杂的边界形状，有

时难以找到相应的映射关系式，且只能应用于二维网格。

（2）代数生成法

代数生成法实际上是一种插值方法。它主要是利用一些线性和非线性的、一维或多维的插值公式来生成网格。其优点是应用简单、直观、耗时少、计算量小，能比较直观地控制网格的形状和密度；缺点是对复杂的几何外形难以生成高质量的网格。

（3）微分方程法

微分方程法是 20 世纪 70 年代以来发展起来的一种方法，基本思想是定义计算域坐标与物理域坐标之间的一组偏微分方程，通过求解这组方程将计算域的网格转化到物理域。其优点是通用性好，能处理任意复杂的几何形状，且生成的网格光滑均匀，还可以调整网格疏密。该方法是目前应用最广的一种结构化网格的生成方法，主要包括椭圆型方程法、双曲线型方程法和抛物型方程法。

以求解椭圆型偏微分方程组为基础的贴体网格生成思想最早是由 Winslow 于 1967 年提出的。1974 年，Thompson、Thames 及 Martin[19]系统而全面地完成了这方面的研究工作，为贴体坐标技术在 CFD 中广泛应用奠定了基础。用椭圆型方程生成的贴体网格质量很高，而且计算时间增加不多，不仅能处理二维、三维问题，而且还能处理定常和非定常问题，如参考文献［20］应用该方法实现了双流道泵叶轮内三维贴体网格的自动生成。此法是目前应用最广的生成网格的微分方程法，其优点是对不规则边界有良好的适应性，在边界附近可以保持网格的正交性而在区域内部整个网格都比较光顺；缺点是计算工作量大。

如果所研究的问题在物理空间中的求解域是不封闭的（如翼型绕流问题），此时可以采用双曲型偏微分方程来生成网格。用双曲型偏微分方程来生成二维网格的方法是 Steger 和 Chaussee[21]于 1980 年提出的，随后 Steger 和 Zick 将该方法推广到三维情况。其优点是不用人为地定义外边界且可以根据需要直接调整网格层数；缺点是由于双曲线型方程会传播奇异性，故当边界不光滑时，会导致生成的网格质量较差。所以，该方法通常用于生成对外边界位置要求不严的外流计算网格或嵌套网格。

采用抛物线型方程来生成网格的思想是由 Nakamura[22]于 1982 年提出来的，这种方法生成网格的过程为：从生成网格的 Laplace 或 Poisson 方程出发，对方程中决定其椭圆特性的那一项作特殊处理，从给定节点布置的初始边界（设为 $\eta=0$）出发，在 $\varepsilon=0$ 及 $\varepsilon=1$ 的两边界上按设定的边界条件（即节点布置），一步一步地向 $\eta=1$ 的方向前进。其优点是概念简单，通过一次扫描就生成了网格而不必采用迭代计算。这种方法可以大大节省计算机时，同时又不会出现双曲线型方程的传播奇异性问题。

2. 块结构化网格生成方法

块结构化网格[23]（Block-Structured Grid），又称组合网格（Composite Grid），是求解不规则区域内流动问题的一种重要网格划分方法，在流体机械 CFD 中有着较为广泛的应用[24]。采用这种方法时，首先根据问题的条件把整个求解区域划分成几个子区域，每一子区域都用常规的结构化网格来离散，通常各区域中的离散方程都各自分别求解。采用该方法的优点是降低了网格生成的难度，可以在不同的区域选取不同的网格密度，便于采用并行算法来求解各块中的代数方程。采用块结构化网格的关键在于不同块的交界处求解变量信息如何高效、准确地传递。

1.6.4　特殊的网格生成方法

在处理一些复杂的问题时，有时用上述网格生成方法并不能生成高质量的网格，而致使数值计算的精度不能满足要求，因此必须采用一些特殊的网格生成技术，主要有以下几种：

（1）曲面网格生成技术

曲面的网格划分[25]结果往往是三维实体网格划分的前提和基础，其质量的优劣对后续生成的三维实体网格的质量有很大影响。曲面网格的划分方法分为两大类：直接方法和间接方法。间接方法是指在参数平面（二维）划分网格通过映射函数把在参数平面网格划分结果映射到空间曲面中去；直接方法与间接方法相对应是指直接在空间曲面上进行网格划分。直接方法对于一些形状复杂的曲面网格的划分结果较差，并且划分的效率要比间接方法低得多，因此目前对于叶片泵的曲面网格划分大都采用间接方法，这样一方面避免了直接生成三维曲面网格的难度，同时发挥现已比较成熟的二维网格划分算法的优势。但是由于参数平面和曲面之间度量映射的非统一性，准确描述一个单元度量映射的畸变是不可能的，因此，映射到曲面上的网格质量不能完全保证。为了保证曲面上的网格质量，基于度量映射的曲面网格生成方法应运而生[26]，这种方法充分考虑了映射变形，且求解速度快，能够取得满意的结果。

（2）动网格生成技术

在工程实际问题中，经常会遇到计算域随着时间的变化而变化的情况，如流体机械中的流固耦合问题[27]等，动网格技术的应用使此类问题的研究模拟结果更贴近于实际，既能解决固体域模型在流场中运动受到流体网格尺寸制约的问题，又能够处理边界条件和内部参数变化的问题。国内外众多学者提出了许多动网格生成技术，目前，主要有 4 种方法[28]：弹性平滑方法（Spring-Base Smoothing Method）、动态层方法（Dynamic Layering Method）、局部重划方法（Local Remeshing Method）和 ALE 方法（Arbitrary Langrangian Eulaerian Element）。前三种动网格划分方法是建立在有限体积法基础之上的，第四种方法是基于有限元基础上的。如几何模型形状大小变化不大时，使用弹性平滑方法可以满足精度要求并且节省计算时间；如果几何模型形状大小变化剧烈（如容积泵的数值计算），为了保证计算精度，对于四边形和六面体网格采用动态层方法比较合适，而对于三角形网格和四面体网格则采用局部重划方法能取得更好的计算结果。ALE 方法多用于结构力学变形方面（如强度计算），计算工作量大，而且在求解流动与换热问题方面不如有限体积法成熟。动网格技术与其他网格生成方法的最大区别是能够与计算域几何形状的变化相吻合，并能根据计算域几何形状变化做出相应的调整，具有更高的网格生成效率和更精确的计算结果。

（3）重叠网格生成技术

重叠网格又称为嵌套网格或叠合网格[29]，是允许各个网格子区域相互重叠、嵌套或覆盖并在各个子网格间通过插值传递流场信息的一种结构网格方法，其网格与相邻的子网格具有重叠的公共区域。田书玲[30]用重叠网格技术对 M6 机翼下外挂物投放过程的非定常绕流进行了模拟。与其他多块分区网格方法（如对接网格，搭接网格等）相比，重叠网格具有如下优势：对子网格区域的边界没有特殊要求；各个子网格的处理是孤立事件，耦合很小（即对子网格的操作不会对整体网格产生影响）。重叠网格的技术核心是通过彼此“挖洞”（Hole Cutting）的方式建立起各网格间的耦合关系。

（4）自适应网格生成技术

为了使网格划分与数值求解过程结合，在 20 世纪 90 年代初提出了自适应网格技术[31]。自适应网格技术能对预先划分好的网格按照用户所定义的误差准则，自动进行误差判断并进行网格疏密程度的调整，即以最适合于所求解问题的方式来布置节点并确定其间的联系，进而取得令人满意的数值模拟计算结果。自适应网格技术是根据得到的误差信息决定解是否有足够的精度，若误差过大，则对网格进行改进使其满足精度要求。自适应网格原则上只需定义一种描述问题几何特性的初始网格及可接受的误差水平，计算机可自动产生能够实现这一有效水平的网格，可以大大提高分析效率和计算结果的可靠性。自适应网格除了在航空和气象领域应用外，在流体机械领域应用也极为广泛，例如，赵会军等[32]把该方法应用于长输管道的水力瞬变中。网格的自适应化能减轻雷诺数 Re 大时解的振荡问题以及数值扩散等问题，因此对于复杂流动与传热问题的求解网格的自适应化的重要性不容低估。自适应网格的最大优点在于它能与物理问题的解相适应，网格的疏密随物理量变化的梯度的大小而自动调节。

1.7 CFD 数值计算技术基础

1.7.1 控制方程

此处对水泵数值计算中所需要的连续方程、动量方程和雷诺时均化的动量方程进行简要的介绍，一般而言不考虑能量方程。本书所研究的内容是水泵数值计算中的湍流模型，输送的介质为水，即可认为是不可压缩介质，所以书中所涉及的方程一般采用不可压缩流体的方程式。

1. 连续方程

连续方程是质量守恒定律的数学表达式，其微分方程的张量形式可以写成：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial (\rho u_j)}{\partial x_j}=0 \tag{1-1}$$

式中 ρ——流体密度；

u_j——与坐标轴 x_j 平行的速度分量，$j=1，2，3$。

对于定常、不可压流动，连续方程可表示为：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0 \tag{1-2}$$

2. 动量方程

动量方程，即 N-S（Navier-Stokes）方程，是动量守恒定律的数学表达式。不可压黏性流体动量方程的微分方程用张量形式可以写成：

$$\frac{\partial u_i}{\partial t}+u_j\frac{\partial u_i}{\partial x_j}=f_i-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}+\nu\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \tag{1-3}$$

3. 雷诺时均方程

湍流是一种复杂的三维非稳态不规则流动[33,34]。从物理结构上可以将湍流流动[35]看成是由各种不同尺度的涡旋叠合而成的流动；这些涡旋可分为大尺度涡和小尺度涡，大尺度涡是引起低频脉动的原因，由流动的边界条件决定，它不断地从主流获得能量并通过涡间的相

互作用将能量传递给小尺度涡；小尺度涡是引起高频脉动的原因，主要由黏性力决定的，小尺度涡不断地从大尺度涡中得到能量并在黏性作用下不断地消失而将能量耗散掉。

虽然 N-S 方程组可以描述湍流的运动，但由于湍流流场中时间及空间特征尺度之间的巨大差异，使得我们在实际的工程流动中很难通过直接求解 N-S 方程来解决问题，当前工程上一般采用雷诺时均方程进行求解。雷诺时均方程是由 N-S 方程经过时均化处理后得到的，其张量表达式如下：

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j}\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = \overline{f_i} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu\frac{\partial^2 \overline{u_i}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j} \tag{1-4}$$

式中，u_i' 为速度脉动量。

对于定常、不可压流动，上述方程可以写成下列形式：

$$\overline{u_j}\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = \overline{f_i} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\nu\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'}\right) \tag{1-5}$$

1.7.2　湍流模型

目前，湍流的数值模拟方法可分为[31]：①直接数值模拟（Direct Numerical Simulation，DNS）；②非直接数值模拟。

直接数值模拟是指直接用瞬时的 N-S 方程对湍流进行计算，无需任何简化或近似，理论上可得到比较准确的计算结果，但由于要模拟最小尺度涡，计算网格的分辨率要足够高，而计算区域的尺寸应足以容纳最大尺度涡，整个计算域的网格节点数的量级非常大，基于目前计算机技术的发展水平，对于水泵这样复杂的三维高雷诺数湍流的数值计算还不现实。

非直接数值模拟包括：①大涡模拟（Large Eddy Simulation，LES）；②雷诺平均法（Reynolds Averaged Navier-Stokes，RANS）；③统计平均法。大涡模拟是近年来研究比较热门的一种模拟方法，其基本思路[31]就是通过过滤函数，将涡分为大涡和小涡，大涡通过直接数值模拟进行计算，而小涡对大涡的影响通过近似的模型来考虑。大涡模拟对计算机的要求也比较高，但低于 DNS 方法。近些年，大涡模拟得到了很快速的发展，Fluent 等商业软件也提供了大涡模拟的方法，但由于其对计算机性能的要求较高，因此应用于实际工程中还不是很成熟。统计平均法[31]是基于湍流相关函数的统计理论，采用相关函数及谱分析的方法来研究湍流结构；统计理论主要涉及小尺度涡的运动，这种方法在工程上应用较少。

现代工程数值计算中更多的是通过求解时均化的 N-S 方程（RANS 方法）来进行计算的。由于时均化的 N-S 方程组不封闭，需要引入额外的方程来封闭该方程组，这就提出了湍流模型的概念。所谓的湍流模型[36-39]就是依据湍流的理论知识、实验数据以及经验，对雷诺平均运动方程中的雷诺应力项建立表达式或方程，并对雷诺应力方程中的一些项进行合理的模化，从而使湍流的平均雷诺方程组封闭的理论。根据对雷诺应力做出的假定或处理方式的不同，可将湍流模型分为雷诺应力模型和涡黏模型。涡黏模型是在 Boussinesq 涡黏假设的基础上提出的，从给出的方程个数来看，可将涡黏模型分为零方程模型（代数模型）、一方程模型和两方程模型。下面从湍流模型的优、缺点及适用范围等方面进行系统地归纳和总结。

1. Boussinesq 涡黏假设

鉴于分子黏性系数与切应力之间的关系，Boussinesq 于 1877 年提出了引用一个涡黏性

系数 μ_t，使湍流的雷诺应力与湍流场中的平均速度梯度之间建立下述关系：

$$\tau_t = -\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{1-6}$$

涡黏性系数 μ_t 与分子动力黏性系数有相同的量纲，但与分子黏度不同的是它还依赖于流动情况，这是涡黏性假设的弱点[32]。

2. 零方程模型

零方程模型又称为代数方程模型，它通过直接建立雷诺应力与平均速度之间的代数关系，不涉及高阶统计量微分方程。这类模型比较简单、直观，无须附加湍流特性的微分方程；但它属于当地平衡型模型，不能反映上游历史的影响，且没有考虑对流和扩散的影响，在一些比较简单的流动，如射流、边界层、管流及喷管流动等[40-42]有较为理想的计算结果，对于表面曲率或压力梯度很大的流动情况，其计算结果不太理想。常见的零方程模型有 Prandtl 混合长度理论，基于 Prandtal 混合长度理论发展出了 C-S 模型、B-L 模型及 J-K 模型等。

（1）Prandtl 混合长度理论

Prandtl 于 1925 年提出了混合长度理论[43,44]。Prandtl 假设湍动黏性系数 ν_t 正比于时均速度梯度和混合长度 l_m，且 ν_t 等于时均速度梯度和混合长度 l_m 的乘积。

$$\nu_t = l_m^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \tag{1-7}$$

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \rho l_m^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \frac{\partial u}{\partial y} \tag{1-8}$$

Prandtl 混合长度理论在预测一些简单流动时取得了较为成功的结果，如管流、槽流、边界层和自由剪切流动等，但它不适用于计算有回流的流动。

（2）C-S 模型

C-S 模型[45]是由 Cebeci 和 Smith 于 1967 年提出的双层代数湍流模型。该湍流模型的涡黏性系数在内、外层分别采用不同的表达式进行表示。内层涡黏性系数的计算表达式可表示为：

$$\mu_{t,i} = (\kappa y)^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{y}{l_D} \right) \right]^2 \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \tag{1-9}$$

外层涡黏性系数的计算表达式为：

$$\mu_{t,o} = 0.0168 u \delta^* \gamma \tag{1-10}$$

$$\gamma = \left[1 + 5.5 \left(\frac{y}{\delta} \right)^6 \right]^{-1} \tag{1-11}$$

式中 l_D——衰减长度系数；
δ^*——边界层位移厚度；
u——外部自由流速度；
γ——间隙因子。

（3）B-L 模型

B-L 模型[46]是由 Baldwin 和 Lomax 两位学者于 1978 年提出的平衡型双层代数湍流模型，它的提出是为了解决边界层属性如 δ，δ_ν^*，U_e 等很难被确定的计算。该模型具有形式简单，计算量小，不需要考虑边界层厚度，健壮易收敛，应用方便等优点[47]；适用于模拟附体流

动[48]，对于较小的局部分离流动，该模型也有一定的模拟能力，尤其对亚临界流动的计算比较有效。但在比较明显的分离流、激波附面层干扰、多物面等流动情况中的计算结果较差，且在多块网格流场计算中，计算物面距离比较困难；另外，当采用 B-L 模型计算跨声速分离流动时，其激波总是较实际位置靠后[49,50]。

B-L 模型的计算形式类似于 C-S 模型，两者之间的主要区别在于外层涡黏性系数的表达式不同。B-L 模型的内层涡黏性系数 $\mu_{t,i}$ 可表示为：

$$\mu_{t,i}=\rho\left[0.4\left(1-\exp\left(-\frac{y^+}{26}\right)\right)y\right]^2\Omega_V \tag{1-12}$$

$$y^+=y\frac{\sqrt{\rho_w\tau_w}}{\mu_w} \tag{1-13}$$

外层涡黏性系数可表示为：

$$\mu_{t,o}=0.0168\times1.6\rho F_{wake}\Gamma \tag{1-14}$$

$$F_{wake}=\min\left[\frac{0.25y_{max}(q_{max}-q_{min})^2}{F_{max}},\ y_{max}F_{max}\right] \tag{1-15}$$

$$F(y)=y\Omega_V\left[1-\exp\left(-\frac{y^+}{26}\right)\right] \tag{1-16}$$

$$\Gamma=\frac{1}{1+5.5\ (0.3y/y_{max})^6} \tag{1-17}$$

式中　y——距壁面的法向距离；

Ω_V——速度旋度（涡量）的模；

w——物面值；

F_{max}——函数 F（y）的最大值；

y_{max}—$F(y)$——取得最大值所对应的物面法向距离；

q——当地速度的模；

Γ——间歇因子。

（4）J-K 模型

1985 年，Johnson D A 和 King L S 提出了非平衡型代数湍流模型 J-K85 模型[51]。该模型采用涡黏性假设，将涡黏性分布同最大雷诺切应力的分布联系起来。J-K 模型虽然仍采用涡黏假设，却具有雷诺应力模型的特点，求解常微分方程比一方程、两方程模型中的偏微分方程要简单且节省计算时间，其计算量稍多于 B-L 模型。J-K85 模型能较好地计算二维翼型分离流动，但该模型在模拟附体平衡流动时激波位置过于靠前，且对边界层厚度的确定非常困难。

Abid R 等几位研究者于 1990 年提出了 J-K90A 模型[52,53]。该模型对分离流动有较好的模拟能力。Johnson D A 和 Coakley T J 于 1990 年提出了 J-K90J 模型来改进 J-K85 模型模拟附体平衡流动激波位置靠前的缺点，该模型考虑到压缩性影响，采用双曲正切函数形式的混合内层湍流黏性系数。1992 年，Johnson D A 在 J-K90J 模型的基础上提出了 J-K92 模型[54]，该模型采用相似的内层混合黏性系数，将平衡流内层黏性系数修改为 B-L 模型内层黏性系数，同时对附面层厚度进行重新定义，同样采用双曲正切函数对流场湍流黏性系数进行合成。J-K92 模型具有更好的模拟大攻角、大分离流动的能力，它能较准确地模拟背风面涡的结构与强度，同时能更好地模拟壁面压力分布。由于 J-K 模型考虑了最大黏性切应力非平衡性质

的影响，因此，它能有效地模拟流动的上游历史效应，与此同时，J-K 模型在模拟强激波诱导分离、大攻角分离流动时要优于 B-L 模型[55]。

3. 一方程模型

在零方程模型中，湍动黏度和混合长度 l_m 都把雷诺应力和当地平均速度梯度相联系，是一种局部平衡的概念，忽略了对流和扩散的影响。一方程湍流模型突破了混合长度假定的局限性。比较常见的一方程湍流模型有 k 方程模型、S-A 模型及 B-B 模型等。

（1）k 方程模型

只保留 k 方程为微分方程，而其他二阶脉动相关量均由代数方程来表示。这种模型对复杂湍流的揭示能力有所降低。用普朗特混合长度来确定湍动能耗散率 ε，进而把 ε 方程简化成代数方程，湍流长度 l、湍动能 k 和耗散率 ε 三者之间的关系式为：

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{l} \tag{1-18}$$

涡黏性系数 ν_t 和湍动能 k 的输运方程为：

$$\nu_t = C_\mu \sqrt{k} l \tag{1-19}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] - \nu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_D \frac{k^{3/2}}{l} \tag{1-20}$$

输运方程中的经验常数为：$C_\mu = 0.09$，$C_D = 0.09$，$\sigma_k = 1$。

（2）S-A 模型

S-A 模型[56,57]是由 Spalart 和 Allmaras 于 1992 年提出的涡黏性一方程湍流模型。该模型的计算量较小，对物面处的网格要求不是很高[58]，具有良好的鲁棒性、稳定性和收敛性，对一定范围内的分离流动模拟能力要好于 B-L 代数方程模型；但对于较大的分离流动，S-A 模型显得比较保守，对流动分离会有抑制作用，计算精度也会有所降低。最初的 S-A 模型应用于如飞机的翼剖面和机翼流动等[59,60]外流的数值计算中，近年来不少学者通过对其进行改进而将其应用到叶轮机械的内流数值计算中[61]。S-A 模型在壁面限制流、附着流、薄层自由剪切流以及受到逆压梯度作用的边界层流动中得到了较多的验证，取得了比较理想的计算结果。

S-A 模型忽略了包含湍动能 k 的雷诺应力项，而是通过对变量 $\tilde{\nu}$（与涡黏性有关的变量）构造输运方程[62]来获得涡黏性系数 ν_t。S-A 模型的涡黏性系数 ν_t 和变量 $\tilde{\nu}$ 的输运方程可表示为：

$$\nu_t = \tilde{\nu} \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{\nu_1}^3} \tag{1-21}$$

$$\chi \equiv \frac{\tilde{\nu}}{\nu} \tag{1-22}$$

$$\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} = \frac{1}{\sigma}\left\{\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\nu + \tilde{\nu})\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j}\right] + C_{b_2}\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j}\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j}\right\} + C_{b_1}\tilde{S}\tilde{\nu} - C_{\omega_1} f_\omega \left(\frac{\tilde{\nu}}{d}\right)^2 \tag{1-23}$$

变量 $\tilde{\nu}$ 的输运方程中的右端分别是梯度耗散项、生成项和湍动能的壁面破坏项。

$$f_\omega = g\left(\frac{1 + C_{\omega_3}^6}{g^6 + C_{\omega_3}^6}\right)^{\frac{1}{6}} \tag{1-24}$$

$$g = r + C_{\omega_2}(r^6 - r) \tag{1-25}$$

$$r = \frac{\tilde{\nu}}{\max(\tilde{S},\ 10^{-16})\kappa^2 d^2} \tag{1-26}$$

$$\tilde{S} = S + \frac{\tilde{\nu} f_{\nu 2}}{\kappa^2 d^2} \tag{1-27}$$

$$S = (u_y - \nu_x,\ \nu_s - w_y,\ w_x - u_s)^{\mathrm{T}} \tag{1-28}$$

式中，d 为到物面的距离，输运方程中的经验常数为：$C_{b_1} = 0.1355$，$C_{b_2} = 0.622$，$\sigma = 2/3$，$\kappa = 0.41$，$C_{\omega_1} = 3.239$，$C_{\omega_2} = 0.3$，$C_{\omega_3} = 2.0$，$C_{\nu_1} = 7.1$。

（3）B-B 湍流模型

B-B 模型[63-65]是由 Barrett S. Baldwin 和 Timothy J. Barth 于 1990 年提出的一方程湍流模型。其输运方程可表示为：

$$\nu_t = C_\mu (\nu \tilde{R}_T) D_1 D_2 \tag{1-29}$$

$$\frac{\mathrm{d}(\nu_t \tilde{R}_T)}{\mathrm{d}t} = (C_{\varepsilon_2} f_2 - C_{\varepsilon_1})\sqrt{\nu \tilde{R}_T G} + \left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_{\varepsilon_2}}\right)\nabla^2(\nu \tilde{R}_T) - \frac{1}{\sigma_{\varepsilon_2}}(\nabla \nu_t)\cdot\nabla(\nu \tilde{R}_T) \tag{1-30}$$

$$D_1 = 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{A_0^+}\right),\ D_2 = 1 - \exp\left(-\frac{y^+}{A_2^+}\right) \tag{1-31}$$

$$f_2(y^+) = \frac{C_{\varepsilon_1}}{C_{\varepsilon_2}} + \left(1 - \frac{C_{\varepsilon_1}}{C_{\varepsilon_2}}\right)\left(\frac{1}{\kappa y^+} + D_1 D_2\right)\left(\sqrt{D_1 D_2} + \frac{y^+}{D_1 D_2}\left(\frac{D_2}{A_0^+}\exp\left(-\frac{y^+}{A_0^+}\right) + \frac{D_1}{A_2^+}\exp\left(-\frac{y^+}{A_2^+}\right)\right)\right) \tag{1-32}$$

D_1 和 D_2 为阻尼函数。输运方程中的经验常数为：$C_{\varepsilon_1} = 1.2$，$C_{\varepsilon_2} = 2.0$，$C_\mu = 0.09$，$A_0{}^+ = 26$，$A_2{}^+ = 10$，$\kappa = 0.41$，$\sigma_{\varepsilon_2} = 0.7$。

4. 两方程模型

较为完善的湍流模型是求解两个变量（速度尺度和长度尺度）的两方程湍流模型。随着计算流体动力学的快速发展，出现了各种不同的两方程湍流模型。下面对几种常见的两方程湍流模型进行介绍。

（1）标准 $k-\varepsilon$ 模型

1972 年，Launder 和 Spalding 提出了标准 $k-\varepsilon$ 模型[66]，该模型是在涡黏理论基础上发展起来的，是从实验现象中总结出来的半经验公式模型。标准 $k-\varepsilon$ 模型的涡黏系数包含了流动的部分历史效应，具有简单、稳定、经济、合理的计算精度、适用范围广等优点，自从被提出之后，它就成为工程流场计算的主要工具之一，且得到了广泛的检验，能够满足较大范围内的工程精度要求。但标准 $k-\varepsilon$ 模型属于高雷诺数湍流模型，只适合于充分发展的完全湍流流动的数值计算。它也具有比较明显的缺点[67,68]：

1）标准 $k-\varepsilon$ 模型假定雷诺应力和当时当地的平均切变率成正比，所以不能反映雷诺应力沿流向的松弛效应；

2）标准 $k-\varepsilon$ 模型具有明显的各向同性特性，不能反映雷诺应力的各向异性特征；

3）平均涡量会影响雷诺应力的分布，这种影响在分离流动中十分明显，而标准 $k-\varepsilon$ 模型不能反映平均涡量对雷诺应力分布的影响。

这些缺点使它在计算复杂剪切湍流场时有明显的不足，且不能很好地预测有回流、大曲率流线及强旋流等流动情况的湍流特性。标准 $k-\varepsilon$ 模型对湍动能 k 和耗散率 ε 构造输运方程。湍动能 k 的输运方程是通过精确的方程推导得到的；耗散率 ε 的输运方程则是通过物理推理，数学上模拟相似原形方程得到的。湍动能 k 和耗散率 ε 的定义公式可表示为：

$$k=\frac{1}{2}\overline{u_i'u_i'} \tag{1-33}$$

$$\varepsilon=\nu\overline{\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j}\right)\left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j}\right)} \tag{1-34}$$

标准 $k-\varepsilon$ 模型的湍流涡黏性系数 ν_t、湍动能 k 和耗散率 ε 的输运方程可表示为：

$$\nu_t=C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{1-35}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t}+u_j\frac{\partial k}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k-\varepsilon \tag{1-36}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+u_j\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{\varepsilon_1}\frac{\varepsilon}{k}G_k-C_{\varepsilon_2}\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{1-37}$$

$$G_k=\nu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{1-38}$$

G_k是由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的生成项，σ_k和 σ_ε分别为湍动能 k 和耗散率 ε 的湍流普朗特数，输运方程中的常数是通过对典型流动的实验结果和算例结果进行最佳拟合而得到的：$C_{\varepsilon_1}=1.44$，$C_{\varepsilon_2}=1.92$，$C_\mu=0.09$，$\sigma_k=1.0$，$\sigma_\varepsilon=1.3$。

（2） RNG $k-\varepsilon$ 模型

由于标准 $k-\varepsilon$ 模型具有明显的各向同性特征，在计算强旋流或带有弯曲壁面的流动时会出现失真等缺点，Yakhot 和 Orzag 于 1986 年提出了 RNG $k-\varepsilon$ 模型[69,70]，随后，Yakhot 和 Smith 于 1992 年修正了 RNG $k-\varepsilon$ 模型。RNG $k-\varepsilon$ 模型是对瞬时的 N-S 方程使用重整化群的数学方法推导出来的模型，在形式上与标准 $k-\varepsilon$ 模型非常相似，但在以下方面进行了改进[71]：

1） 标准 $k-\varepsilon$ 模型中的系数是由试验结果和典型算例拟合得到的经验常数，而 RNG $k-\varepsilon$ 模型中的系数则由重整化群理论计算所得；

2） RNG $k-\varepsilon$ 模型对耗散率 ε 的输运方程进行了修正，增加了 R 项来考虑高湍流应变率的影响，即在一定程度上考虑了湍流的各向异性效应和湍流的漩涡特性，从而改善了对较为复杂的湍流如旋转流和大曲率流等流动的预报精度。

这些特点使得 RNG $k-\varepsilon$ 模型比标准 $k-\varepsilon$ 模型在更广泛的流动中具有更高的可信度和精度。RNG $k-\varepsilon$ 模型的缺点是该模型是为高张力引起的湍流黏度降低而设计的。RNG $k-\varepsilon$ 模型的涡黏性系数 ν_t、湍动能 k 和耗散率 ε 的输运方程可表示为：

$$\nu_t=C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{1-39}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t}+u_j\frac{\partial k}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k-\varepsilon \tag{1-40}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+u_j\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{\varepsilon_1}\frac{\varepsilon}{k}G_k-C_{\varepsilon_2}\frac{\varepsilon^2}{k}-R \tag{1-41}$$

$$R=\frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}\frac{\varepsilon}{k}G_k \tag{1-42}$$

$$\eta=\frac{Sk}{\varepsilon} \tag{1-43}$$

$$S=\sqrt{2\overline{S_{ij}}\,\overline{S_{ij}}} \tag{1-44}$$

$$\overline{S_{ij}}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \tag{1-45}$$

输运方程中的常数为：$C_{\varepsilon_1}=1.42$，$C_{\varepsilon_2}=1.68$，$C_\mu=0.0845$，$\sigma_k=0.7179$，$\sigma_\varepsilon=0.7179$，$\eta_0=4.38$，$\beta=0.012$。

（3）Realizable $k-\varepsilon$ 模型

标准 $k-\varepsilon$ 模型在对湍流耗散率 ε 的输运方程模化时过于粗糙，在某些情况下不能给出合理的湍流尺度，所以标准 $k-\varepsilon$ 模型对于具有较高主流剪切率、较大曲率壁面或有流动分离情况的流场计算往往得不到理想的结果。Shih 和 Liou 等针对这些缺陷进行修正，于 1995 年提出了 Realizable $k-\varepsilon$ 模型[72]。该模型是一种新型的高雷诺数湍流模型，它在如下方面进行了改进：

1）Realizable $k-\varepsilon$ 模型的湍流黏度表达式中的系数 C_μ 表示为湍流时间尺度与应变张量和旋转张量的函数，从而引入了与旋转和曲率相关的内容；

2）Realizable $k-\varepsilon$ 模型对耗散率 ε 的输运方程采用了新的模化方法，使雷诺主应力和切应力满足可实现性条件；

3）对湍动能 k 和湍流耗散率 ε 输运方程中的模型系数进行了修改。

Realizable$k-\varepsilon$ 模型在定义湍流黏度时考虑了平均旋度的影响，这样使得在计算旋转和静态流动区域时不能提供自然的湍流黏度。Realizable $k-\varepsilon$ 模型的这些特性使得该模型在对平板射流和圆柱射流的发散比率预测上得到了更为精确的结果，且对于旋转流动、强逆压梯度的边界层流动、流动分离和复杂的二次流等有很好的表现。Realizable $k-\varepsilon$ 模型已被有效地应用于旋转均匀剪切流、平面混合流、平面射流、圆形射流、管道内充分发展流动、边界层流动以及带分离的流动等[73]。Realizable $k-\varepsilon$ 模型的涡黏性系数 ν_t、湍动能 k 和湍流耗散率 ε 的输运方程可表示为：

$$\nu_t=C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{1-46}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t}+u_j\frac{\partial k}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k-\varepsilon \tag{1-47}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+u_j\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_1S\varepsilon-C_2\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{\nu\varepsilon}} \tag{1-48}$$

$$C_1=\max\left(0.43,\frac{\eta}{\eta+5}\right) \tag{1-49}$$

$$S=\sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \tag{1-50}$$

$$C_\mu=\frac{1}{A_0+A_s\dfrac{U^*k}{\varepsilon}} \tag{1-51}$$

$$A_s = \sqrt{6}\cos\varphi \tag{1-52}$$

$$\varphi = \frac{1}{3}\arccos(\sqrt{6}W) \tag{1-53}$$

$$W = \frac{\overline{S_{ij}}\,\overline{S_{jk}}\,\overline{S_{ki}}}{(S_{ij}S_{ij})^{1/2}} \tag{1-54}$$

$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \widetilde{\Omega}_{ij}\widetilde{\Omega}_{ij}} \tag{1-55}$$

$$\widetilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\xi_{ijk}\omega_k \tag{1-56}$$

$$\Omega_{ij} = \overline{\Omega}_{ij} - \xi_{ijk}\omega_k \tag{1-57}$$

$$\overline{\Omega}_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial\omega_j}{\partial x_i} - \frac{\partial\omega_i}{\partial x_j}\right) \tag{1-58}$$

σ_k，σ_ε分别是湍动能 k 和湍流耗散率 ε 的湍流普朗特数，$\overline{\Omega}_{ij}$为旋转坐标系中的时均转动速率张量。输运方程中的常数为：$A_0=4.0$，$C_2=1.9$，$\sigma_k=1.0$，$\sigma_\varepsilon=1.2$。

（4）低雷诺数 $k-\varepsilon$ 模型

上述几种 $k-\varepsilon$ 模型都是适用于高雷诺数流动计算的两方程模型，对于近壁面低雷诺数流动区域的计算需要加入壁面函数，而壁面函数的表达式主要是根据比较简单的平行流动边界层的实测资料归纳出来的。Jones 和 Launder[74,75] 认为，低雷诺数的流动主要体现在黏性底层中，流体的分子黏性起着绝对支配地位，故通过对高雷诺数 $k-\varepsilon$ 模型进行修改，使其可应用于各种雷诺数流动区域的计算：

1）通过控制方程中的扩散系数项同时包括湍流扩散系数和分子扩散系数两部分来体现分子黏性的影响；

2）在系数计算公式中引入湍流雷诺数 $Re_t=\rho k^2/(\eta\varepsilon)$，使控制方程的有关系数考虑不同流态的影响；

3）在 k 方程中应考虑壁面附近湍动能耗散的各向异性特性。

低雷诺数 $k-\varepsilon$ 模型的涡黏性系数 ν_t、湍动能 k 和耗散率 ε 的输运方程可表示为：

$$\nu_t = C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{1-59}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j\frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k - \varepsilon - 2\nu\left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial n}\right)^2 \tag{1-60}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{\varepsilon_1}\frac{\varepsilon}{k}G_k f_1 - C_{\varepsilon_2}\frac{\varepsilon^2}{k}f_2 + 2\nu\nu_t\left(\frac{\partial^2 u}{\partial n^2}\right)^2 \tag{1-61}$$

$$\left.\begin{aligned} f_\mu &= \exp(-2.5/(1+Re_t/50)) \\ f_1 &\approx 1.0 \\ f_2 &= 1.0 - 0.3\exp(-Re_t^2) \\ Re_t &= \rho k^2/(\eta\varepsilon) \end{aligned}\right\} \tag{1-62}$$

当 Re_t很大时，f_μ、f_1 和 f_2 均趋近于 1；当局部湍流的 Re_t 数小于 150 时，使用低雷诺数 $k-\varepsilon$ 模型，此时，充分发展的湍流核心区及黏性底层采用同一套公式进行计算，但由于黏性底层的速度梯度较大，所以黏性底层的网格要求更密[31]。

（5）$k-\omega$ 模型

$k-\varepsilon$ 模型中的湍流耗散率 ε 缺乏自然边界条件，需要引入额外的边界条件，这些边界条件要么渐进不一致，要么数值计算困难，且 $k-\varepsilon$ 模型对逆压梯度缺乏敏感，常常过多地模拟切应力，推迟分离。为克服 $k-\varepsilon$ 模型的这些固有缺陷，Wilcox 提出了形式更为简单的 $k-\omega$ 模型[76,77]，该模型是积分到壁面的两方程线性涡黏性模型，它不需要确定物面法向距离，提高了对逆压梯度的灵敏度，降低了近壁区的计算难度，且不包含 $k-\varepsilon$ 模型中需要的复杂非线性阻尼函数，因此更加精确和稳定。

$k-\omega$ 模型不会阻止近壁区的耗散减弱，在处理靠近物面区域的湍动能时，可能会得到渐进不一致的解；对于自由剪切流动，$k-\omega$ 模型的计算结果过分地依赖于自由流的 ω 值[78]。

$k-\omega$ 模型在尾流、混合流动、平板绕流、圆柱绕流、放射状喷射流、墙壁束缚流等流动情况中得到了较为满意的检验结果[79]。

$k-\omega$ 模型采用湍动能 k 和比耗散率 ω 的输运方程来确定涡黏性系数，其涡黏性系数 ν_t、湍动能 k 和比耗散率 ω 的输运方程可表示为：

$$\nu_t=\gamma^*\frac{k}{\omega} \tag{1-63}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t}+u_j\frac{\partial k}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\nu+\sigma_k\nu_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k-\beta_k k\omega \tag{1-64}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t}+u_j\frac{\partial \omega}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\nu+\sigma_\omega\nu_t)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right]+\gamma\frac{\omega}{k}G_k-\beta_\omega\omega^2 \tag{1-65}$$

输运方程中的常数为：$\gamma^*=1$，$\gamma=5/9$，$\beta_k=0.09$，$\beta_\omega=0.075$，$\sigma_k=1/2$，$\sigma_\omega=1/2$。

（6）BSL $k-\omega$ 模型

为了保持 Wilcox $k-\omega$ 模型在近壁面区域的健壮性和计算的精确性，且在边界层外边缘和自由流区充分利用标准 $k-\varepsilon$ 模型的优势[56]，提出了 BSL $k-\omega$ 模型[80]。BSL $k-\omega$ 模型的基本思想就是：在靠近壁面的区域采用比较精确的 $k-\omega$ 模型，而在其余边界层和自由流区域采用标准 $k-\varepsilon$ 模型，为了得到统一的计算公式，需要将标准 $k-\varepsilon$ 模型转换成 $k-\omega$ 模型的形式，然后通过加权函数来处理两套公式的系数。整合后的表达式与 $k-\omega$ 模型的主要差别就在于比耗散率 ω 的输运方程中增加了一项附加的交叉扩散项，且输运方程的模型常数发生了改变，变换后的标准 $k-\varepsilon$ 模型具有类似于 Wilcox $k-\omega$ 模型的性能。BSL $k-\omega$ 模型的输运方程可表示为：

$$\frac{\partial k}{\partial t}+u_j\frac{\partial k}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\nu+\sigma_k\nu_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k-\beta^* k\omega \tag{1-66}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t}+u_j\frac{\partial \omega}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\nu+\sigma_\omega\nu_t)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right]+2(1-F_1)\sigma_{\omega_2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j}+\gamma\frac{\omega}{k}G_k-\beta\omega^2 \tag{1-67}$$

在外边界层和自由流区域，Wilcox $k-\omega$ 模型对自由流的 ω 值有着较强的敏感性，而标准 $k-\varepsilon$ 模型则可避免这一不足，所以在加权函数 F_1 的构造中，将加权函数 F_1 设计成在子层或边界层的对数区域等于 1，在尾流区域逐渐变换为零，即意味着在靠近壁面的区域激活 $k-\omega$ 模型，而在远离壁面或尾流的外部区域和自由剪切流区域中激活标准 $k-\varepsilon$ 模型。

（7）SST $k-\omega$ 模型

SST $k-\omega$ 模型[81-83]是在 BSL $k-\omega$ 模型的基础上改进了涡黏性的定义，以考虑湍流主切

应力输运的影响，这样，SST $k-\omega$ 模型使得对逆压梯度流动的预测（如分离流）得到了重要的改进[84]。SST $k-\omega$ 模型的湍动能 k 和比耗散率 ω 的输运方程表达式为：

$$\frac{\partial k}{\partial t}+u_j\frac{\partial k}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_{k_3}}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k-\beta' k\omega \tag{1-68}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t}+u_j\frac{\partial \omega}{\partial x_j}=\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{\sigma_{\omega_3}}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right]+\alpha_3\frac{\omega}{k}G_k-\beta_3\omega^2+2(1-F_1)\frac{1}{\sigma_{\omega_2}\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j} \tag{1-69}$$

加权函数 F_1 的表达式为：

$$F_1=\tanh(\arg_1^4) \tag{1-70}$$

$$\arg_1=\min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{\beta'\omega y},\ \frac{500\nu}{y^2\omega}\right),\ \frac{4\rho k}{CD_{k\omega}\sigma_{\omega_2}y^2}\right] \tag{1-71}$$

$$CD_{k\omega}=\max\left(2\rho\frac{1}{\sigma_{\omega_2}\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j},\ 1.0\times10^{-10}\right) \tag{1-72}$$

同时，由于原始 $k-\omega$ 模型没有考虑湍流切应力的输运。Menter 认为这会导致对于涡黏性的过分估计。因此他提出应该使用以下公式对涡黏性进行限制：

$$\nu_t=\frac{a_1k}{\max(a_1\omega,SF_2)} \tag{1-73}$$

$$F_2=\tanh(\arg_2^2) \tag{1-74}$$

$$\arg_2=\max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta'\omega y},\ \frac{500\nu}{y^2\omega}\right) \tag{1-75}$$

F_2 是类似 F_1 的混合函数，用来修正 F_1 在自由剪切流中的误差。

（8）$q-\omega$ 模型

Coakley 于 1983 年提出了两方程线性涡黏性模型 $q-\omega$ 模型[85]，该模型采用 q 和 ω 的输运方程来确定湍流尺度，与传统的两方程线性涡黏性模型相比，$q-\omega$ 模型采用了新的近壁项以及更多地考虑了应力松弛影响。采用新的近壁项增强了计算的起始阶段和尖前缘、后缘处的计算稳定性；增加对应力松弛影响的考虑能够更准确地预测激波/边界层相互作用等复杂流动。

$q-\omega$ 模型的涡黏性系数 ν_t、q 和比耗散率 ω 的输运方程可表示为：

$$\nu_t=C_\mu D\frac{k}{\omega}=C_\mu D\frac{q^2}{\omega} \tag{1-76}$$

$$\frac{\partial q}{\partial t}+u_j\frac{\partial q}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{Pr_q}\right)\frac{\partial q}{\partial x_j}\right]+\frac{1}{2}\left(C_\mu D\frac{\Phi}{\omega^2}-\frac{2}{3}\frac{\Psi}{\omega}-1\right)q\omega \tag{1-77}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t}+u_j\frac{\partial \omega}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\nu+\frac{\nu_t}{Pr_\omega}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right]+\left[C_1\left(C_\mu\frac{\Phi}{\omega^2}-\frac{2}{3}\frac{\Psi}{\omega}\right)-C_2\right]\omega^2 \tag{1-78}$$

$$\Phi=\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}-\frac{2}{3}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\delta_{ij}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{1-79}$$

$$\Psi=\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \tag{1-80}$$

$$D = [1 - \exp(-\alpha Re)]\frac{1}{1+\beta\chi} \tag{1-81}$$

$$Re = \frac{qy}{\nu} \tag{1-82}$$

$$\chi = \sqrt{C_\mu \frac{\Phi}{\omega^2} - 1} \tag{1-83}$$

式中　y——到最近壁面的距离。

输运方程中的常数为：$C_\mu = 0.09$，$C_1 = 0.405D + 0.045$，$C_2 = 0.92$，$Pr_q = 1.0$，$Pr_\omega = 1.3$，$\alpha = 0.0065$。

5. 雷诺应力模型

（1）雷诺应力模型

$k-\varepsilon$ 模型是建立在 Boussinesq 的涡黏性假设基础上的，该模型无法描述湍流能量转变为平均运动能量的传递过程和涡黏性的各向异性张量特性。为此，通过直接建立雷诺应力输运方程来封闭湍流流动方程组，发展出了雷诺应力模型（Reynolds Stress Equation Model，RSM）。RSM 模型是指直接求解雷诺应力控制微分方程的二阶湍流模型，与 $k-\varepsilon$ 模型相比，RSM 模型计算得到的湍流特性更为合理一些，普遍性和预测能力也均优于其他二阶模型；但它过于复杂，需要求解的微分方程数目较多，计算机耗时较长。经模化后的雷诺应力方程可表示为：

$$\frac{D\,\overline{u_i'u_j'}}{Dt} = D_{ij} + P_{ij} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\varepsilon + PS \tag{1-84}$$

$$D_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_l}\left[\left(C_k\frac{k^2}{\varepsilon} + \nu\right)\frac{\partial \overline{u_i'u_j'}}{\partial x_l}\right] \tag{1-85}$$

$$P_{ij} = -\left(\overline{u_i'u_l'}\frac{\partial u_j}{\partial x_l} + \overline{u_j'u_l'}\frac{\partial u_i}{\partial x_l}\right) \tag{1-86}$$

$$PS = -C_1\frac{\varepsilon}{k}\left(\overline{u_i'u_j'} - \frac{2}{3}\delta_{ij}k\right) + C_2\left(\overline{u_i'u_l'}\frac{\partial u_j}{\partial x_l} + \overline{u_j'u_l'}\frac{\partial u_i}{\partial x_l} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\overline{u_n'u_m'}\frac{\partial u_n}{\partial x_m}\right) \tag{1-87}$$

湍动能 k 及耗散率 ε 的输运方程为：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_l\frac{\partial k}{\partial x_l} = \frac{\partial}{\partial x_l}\left[\left(C_k\frac{k^2}{\varepsilon} + \nu\right)\frac{\partial k}{\partial x_l}\right] - \overline{u_i'u_l'}\frac{\partial u_i}{\partial x_l} - \varepsilon \tag{1-88}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_l\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_l} = \frac{\partial}{\partial x_l}\left[\left(C_\varepsilon\frac{k^2}{\varepsilon} + \nu\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_l}\right] - \left(C_{\varepsilon_1}\frac{\varepsilon}{k}\overline{u_i'u_j'}\frac{\partial u_i}{\partial x_l} + C_{\varepsilon_2}\frac{\varepsilon^2}{k}\right) \tag{1-89}$$

式中　D——对应下标输运量的扩散项；

P——对应下标的源项；

PS——雷诺应力方程中的压力-应变项。

输运方程中的经验常数为：$C_k = 0.09 \sim 0.11$，$C_1 = 1.5 \sim 2.2$，$C_2 = 0.4 \sim 0.5$，$C_\varepsilon = 0.07 \sim 0.09$，$C_{\varepsilon_1} = 1.41 \sim 1.45$，$C_{\varepsilon_2} = 1.9 \sim 1.92$。

（2）代数应力模型

为了便于工程应用，在保存 RSM 模型湍流各向异性特点的基础上将其雷诺应力的微分方程简化为代数表达式，提出了代数应力模型（Algebraic Stress Equation Model，ASM）[86]，

该模型的计算量比雷诺应力模型要少，但因为比 $k-\varepsilon$ 模型多解 6 个代数方程组，其计算量还是要远大于 $k-\varepsilon$ 模型。代数应力模型在带有扭曲和出现二次流的方形管道、三角形管道以及带有强旋的管道流动中得到了较为满意的计算结果。

不考虑浮力作用、系统无旋转、忽略固体壁面的反射影响时，代数应力方程可表示为：

$$-\rho\left(\overline{u_i'u_k'}\frac{\partial u_j}{\partial x_k}+\overline{u_j'u_k'}\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\right)-C_1\rho\frac{\varepsilon}{k}\left(\overline{u_i'u_j'}-\frac{2}{3}k\delta_{ij}\right)-C_2\left(P_{ij}-\frac{1}{3}P_{kk}\delta_{ij}\right)-\frac{2}{3}\rho\varepsilon\delta_{ij}=0 \quad (1\text{-}90)$$

$$P_{ij}=-\rho\left(\overline{u_i'u_k'}\frac{\partial u_j}{\partial x_k}+\overline{u_j'u_k'}\frac{\partial u_i}{\partial x_k}\right) \quad (1\text{-}91)$$

代数应力模型中的湍动能 k 和耗散率 ε 的输运方程分别为：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+u_j\frac{\partial(\rho k)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+\frac{1}{2}P_{ii}-\rho\varepsilon \quad (1\text{-}92)$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+u_j\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]-\frac{1}{2}C_{\varepsilon_1}P_{ii}-C_{\varepsilon_2}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (1\text{-}93)$$

输运方程中的常数为：$C_\mu=0.09$，$C_{\varepsilon_1}=1.44$，$C_{\varepsilon_2}=1.92$，$\sigma_k=0.82$，$\sigma_\varepsilon=1.0$。

1.7.3 离散方法

为实现流动的数值计算，还必须对控制方程做适当的离散。目前常用的离散方法有：有限差分法、有限元法、有限体积法等[87]。

有限差分法（Finite Differece Method，FDM）：数值解法中最经典的方法。它是将求解域划分为差分网格，用有限个网格节点代替连续的求解域，然后将偏微分方程的导数用差商代替，推导出含有离散点上有限个未知数的差分方程组。求差分方程组的解，就是微分方程定解问题的数值近似解，这是一种直接将微分问题变为代数问题的近似数值解法。这种方法发展较早，比较成熟，较多的用于求解双曲线型和抛物线型问题。用它求解边界条件复杂、尤其是椭圆型问题不如有限元法或有限体积法方便。

有限元法（Finite Element Method，FEM）：将一个连续的求解域任意分成适当形状的许多微小单元，并于各小单元分片构造插值函数，然后根据极值原理，将问题的控制方程转化为所有单元上的有限元方程，把总体的极值作为各单元极值之和，即将局部单元总体合成，形成嵌入了指定边界条件的代数方程组，求解该方程组就得到各节点上待求的函数值。有限元法因求解速度较有限差分法和有限体积法慢，在商用 CFD 软件中应用并不普遍。目前商用 CFD 软件中，FIDAP 采用的是有限元法。而有限元法目前在固体力学分析中占绝对比例，几乎所有固体力学分析软件全部采用有限元法。

有限体积法（Finite Volume Method，FVM）：近年发展非常迅速的一种离散化方法，计算效率高。目前在 CFD 领域有广泛的应用，大多数商用 CFD 软件都采用这种方法，本书的离散方程是在有限体积法的基础上生成的。

1.7.4 数值算法

流场计算的基本过程是在空间上用有限体积法或其他类似方法将计算域离散成许多小的体积单元，在每个体积单元上对离散后的控制方程组进行求解。流场计算方法的本质就是对

离散后的控制方程组的求解。通常对离散后的控制方程组的求解可分为耦合式解法（coupled method）和分离式解法（segregated method），归纳后如图 1-2 所示[88]。

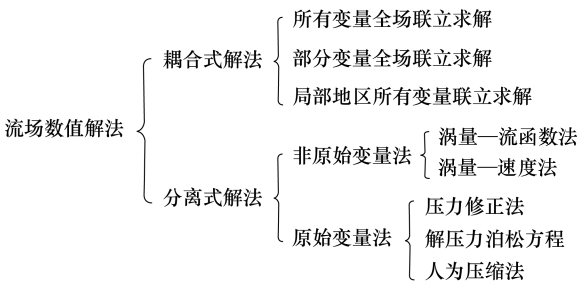


图 1-2　流场数值计算方法分类图

1. 耦合式解法

耦合式解法同时求解离散化的控制方程组，联立求解出各变量，其求解过程如下：

1）假定初始压力和速度等变量，确定离散方程的系数及常数项等。

2）联立求解连续方程、动量方程、能量方程。

3）求解湍流方程及其他标量方程。

4）判断当前时间步上的计算是否收敛。如不收敛，返回到第 2）步，迭代计算。若收敛，重复上述步骤，计算下一步时间步的物理量。

耦合式解法可以分为所有变量整场联立求解（隐式解法）、部分变量整场联立求解（显隐式解法）、在局部地区（如一个单元上）对所有变量联立求解（显式解法）。最后一种求解方法，是在一个单元上求解所有变量后，逐一地在其他单元上求解所有的未知量。这种方法在求解某个单元时，要求相邻单元的变量解是已知的。

当计算中流体的密度、能量、动量等参数存在相互依赖关系时，采用耦合式解法具有很大优势，如求解关于 u、v、ρ、T 共 4 个变量的方程组。其主要应用包括高速可压流动、有限速率反应模型等。耦合式解法中，所有变量整场联立求解应用较普遍，求解速度较快，而在局部对所有变量联立求解仅用于声变量动态性极强的场合，如微波捕捉。

假设计算区域内的节点数为 N，则每一时间步内需求解 $4N$ 个方程构成的代数方程组（三个速度方程及一个压力或密度方程）。不足之处是耦合式解法计算效率较低、内存消耗大。

2. 分离式解法

分离式解法不直接解联立方程组，而是顺序地、逐个地求解各变量代数方程组。按是否直接求解原始变量 u、v、w 和 p，分离式解法分为非原始变量法和原始变量法。

非原始变量法是取旋度 ω 和流函数 Ψ 或旋度 ω 和原始变量 u、v、w 作为基本变量的流场数值计算方法。非原始变量法分为涡量-流函数法和涡量-速度法。涡量-流函数法不直接求解原始变量 u、v、w 和 p，而是求解旋度 ω 和流函数 Ψ。涡量-速度法不直接求解流场的原始变量 p，而是求解旋度 ω 和速度 u、v、w。这两种方法的本质、求解过程和特点基本一致，共同优点是：方程中不出现压力项，从而避免了因求压力带来的问题。另外，涡量-流函数法在某些条件下，容易给定旋度值，比给定速度值要容易。这类非原始变量法的缺点是：不易扩展到三维情况，因为三维水流不存在流函数；当需要得到压力场时，需要额外的计算；对于固壁面边界，其上的旋度极难确定，没有适宜的固体壁面上的边界条件，往往使涡量方

程的数值解发散或不合理。因此，尽管非原始变量的解法巧妙地消去了压力梯度项，且在二维情况下涡量-流函数法要少解一个方程，却未能得到广泛的应用。人们宁可想办法处理压力梯度项，即直接利用原始变量 u、v、w 和 p 作为因变量进行求解。

原始变量法是取速度 u、v、w 和压强 p 作为基本变量的流场数值计算方法。原始变量法包含的解法比较多，常用的有解压力泊松方程法、人为压缩法和压力修正法。解压力泊松方程法需要对方程取散度等方法处理将动量方程转变为泊松方程，然后对泊松方程进行求解。

人为压缩法主要是根据可压的气体通过联立求解速度分量与密度的求解原理启发，引入人为压缩性和人为状态方程，以此对不可压流体的连续性方程施加干扰，将连续方程嵌入人为密度的基本方程。但这种方法要求时间步长必须很小，因此限制了它的广泛应用。

压力修正法是目前工程上使用较为广泛的流场数值计算方法。压力修正法的实质是迭代法。在每一时间步长的运算中，先给出压力场的假定初始值，据此求出假定的速度场。再求解根据连续方程导出的压力修正方程，对假定的压力场和速度场进行修正。如此循环往复，可得出压力场和速度场的收敛解。其基本思路是：

1）假定初始压力场；

2）利用压力场求解动量方程，得到速度场；

3）利用速度场求解连续方程，使压力场得到修正；

4）根据需要，求解湍流方程及其他标量方程；

5）判断当前时间步上的计算是否收敛。若不收敛，返回到第 2）步，继续迭代计算；若收敛，计算下一时间步的物理量。

压力修正法有多种实现方式，其中，压力耦合方程组的半隐式方法（SIMPLE 算法）应用最为广泛，也是各种商用 CFD 软件普遍采纳的算法[89]。SIMPLE（Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations）算法由 Patanker 与 Spalding 于 1972 年提出[90,91]，它是一种主要用于求解不可压流场的数值方法，但也被用于计算可压流场。其基本思想被其他数值方法所采纳[92,93]，所以该方法是目前工程上应用最为广泛的一种流场计算方法，它属于压力修正法的一种。其核心是采用“猜测-修正”的过程，在交错网格的基础上来计算压力场，从而达到求解动量方程的目的。

3. SIMPLE 算法的改进

尽管基于原始变量法是目前不可压缩流动问题数值求解中使用最为成熟的一类方法，但是在求解不压缩流体时，都有一个不可回避的问题，即压力-速度耦合问题。由 Patanker 创建的基于交错网格 SIMPLE 算法巧妙地解决了这一问题，也解决了很多工程实际问题。但该方法缺点也很明显，因为速度分量 u、v、w 与压力 p 存储在不同的节点位置上，求 u 方程 v、w 需插值，求 v 方程 u、w 需插值，求 w 方程 u、v 需插值。此外，为保证 u、v、w 取值的等价性，需保存 u、v、w 上次迭代值。不仅 u、v、w 需插值，如果物性系数在流场中有变化，同样需插值。因此占用的内存大，需进行繁琐的插值[94-96]。Peric[97] 先后采用非交错网格（同位网格）进行数值求解。为保证压力与速度的耦合，界面速度采用动量插值 MI（Momentum Interpolation）[98]，也称为压力加权插值 PWIM（Pressure Weighted Interpolation Method）[99]。由于动量插值算法是线性插值与动量插值组合而成的一种混合插值[77]，也就是说流场计算结果或多或少与速度松弛因子有关，为克服 PWIM 的这一缺点，界面速度更新采用亚松弛计算。还有一种更方便的办法就是在动量方程插值的计算中将动量方程主对角元系数中隐含的

松弛因子取为 1[100,101]，该方法目前比较流行。由于界面速度不是线性插值，而是动量插值，因此必须同时存储界面与节点速度。

Date[102]指出上述两种插值方法不仅不必要，而且在压力变化严重偏离线性时会得到虚假的结果，他提出的直角坐标系中结构化同位网格上全新的压力校正方程，可在粗糙网格上得到光滑的压力场。这种算法简化了编程，占用内存小，因此，是一种更经济的算法，计算时，界面速度、压力均采用算术平均。

本书的 SIMPLED 算法基本思想与 Date 相同，不同的是对界面速度和压力的处理方法。由于采用的是非结构化网格，因此对于离心泵的内流 CFD 计算，Date 算法中的算术平均可能会引起不合理的速度场和压力场，因此，需要对界面速度和压力的平均方法重新考虑。而对非结构化网格中心的标量取平均，通常采用以节点到邻点的距离为倒数的加权平均形式[103]，以减少计算时间，所以，在对压力进行平均时，采用倒数加权平均方法，这也是参考文献［104］、［105］所采纳的方法。与压力相比，速度对计算结果的精度影响更大，综合考虑数学上几种常用的平均方法，对界面速度分别取算术平均、倒数加权平均，但是得到的结果不是很令人满意，从而考虑将界面速度以所在单元的面积为权重作平均加权插值，使场的分布控制在一个合理的范围内，以提高计算精度。

第2章 叶片泵三维造型及实例

建立能够准确描述所研究问题的计算域是数值计算顺利进行的基础，计算域的光顺程度也会影响网格划分的难易及网格生成的质量。本章以目前在叶片泵行业中应用非常广泛的Pro/Engineer 为例来讲解叶片泵的水体建模方法。

2.1 Pro/Engineer 基本操作

Pro/Engineer 是美国 PTC 公司开发的产品，简称 Pro/E。Pro/E 是目前最为流行的 CAD/CAM/CAE 工业设计软件之一，广泛应用于机械、模具、汽车、航空航天、玩具等领域。Pro/E 的功能非常全面，它集成了三维实体模型设计、三维曲面模型设计、二维草图设计、工程图设计和装配设计等功能，是一款全方位的工业设计软件。

2.1.1 创建与保存文件

启动 Pro/E 软件，单击【新建】命令，出现【新建】对话框，如图 2-1 所示。在【类型】栏选择所需的类型（默认类型为【零件】），在【子类型】栏选择所需的类型（默

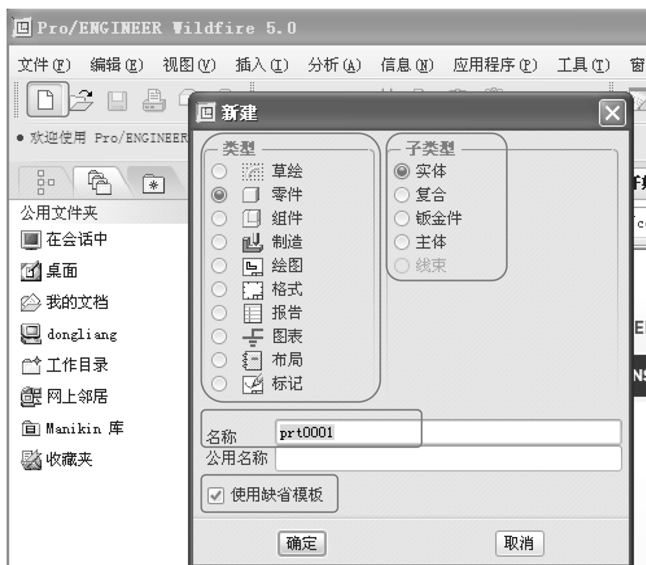


图 2-1 建立文件

认类型为【实体】)，在【名称】栏输入文件名称（不能包含中文)，如果不使用缺省模板，可将【使用缺省模板】前的对勾单击去掉，选择其他模板。单击【确定】按钮，进入造型界面。

进入造型界面后可以进行各种造型，造型完成后，单击【保存】图标，出现【保存】对话框。如图 2-2 所示，选择文件的保存路径，单击【确定】按钮。

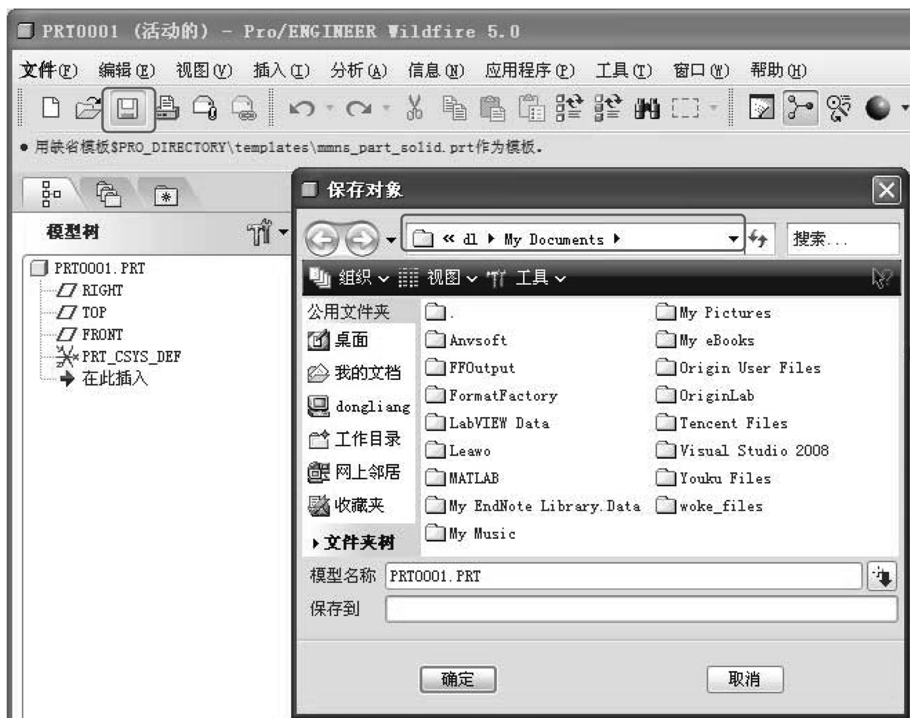


图 2-2　保存文件

2.1.2　草绘

在 Pro/E 中，草绘是进行三维零件设计的基础。进入造型界面，单击界面右侧的【草绘】图标，弹出对话框，如图 2-3 所示，在【平面】输入框选择造型界面中的任一基准平面，单击【草绘】按钮进入草绘界面。

草绘工具栏位于草绘主界面的右侧，如图 2-4 所示。常用图标及功能如下：：选取项目；：创建直线；：创建矩形；：创建圆；：创建弧；：创建圆角；：创建样条曲线；：创建点；：通过边界创建图元；：创建定义尺寸；：添加几何约束；：修剪图元；：完成；：取消。

2.1.3　创建基准

基准平面、基准轴、基准点等基准特征，主要用于辅助创建特征和定义模型的空间位置。基准工具栏位于造型界面的右侧，如图 2-5 所示。：创建基准平面；：创建基准轴；：创建基准曲线；：创建基准点；：创建基准坐标系。

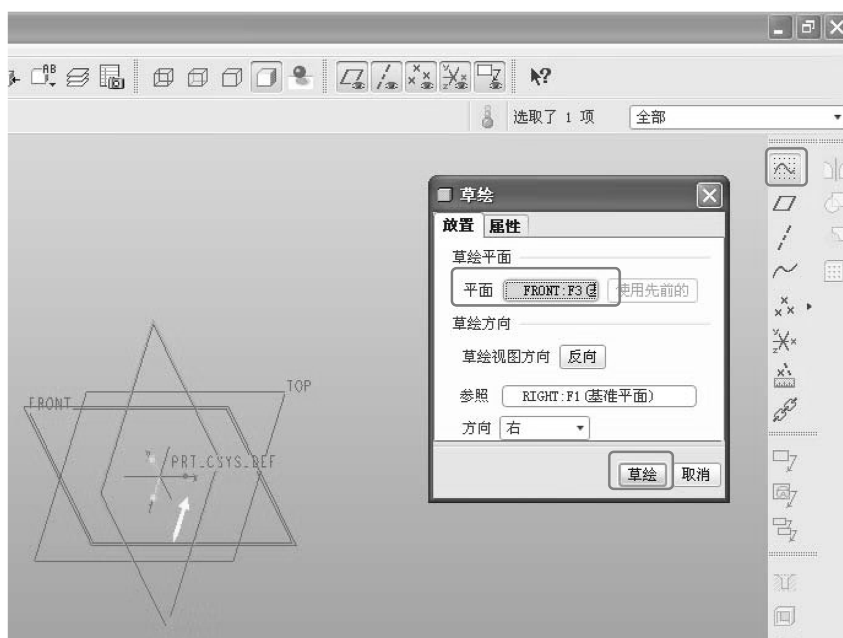


图 2-3　启动草绘命令

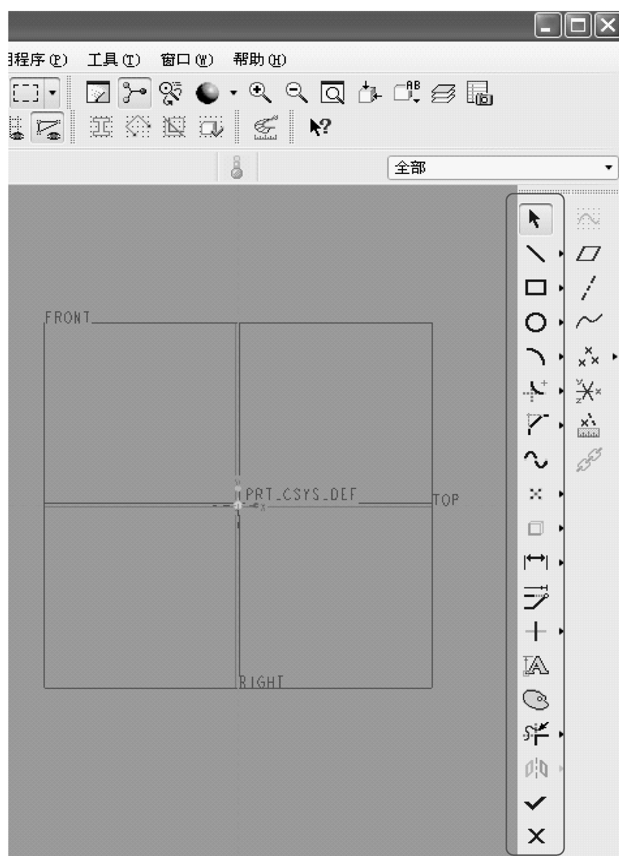


图 2-4　草绘界面

基准点可以用来辅助定义某些特征参数、创建坐标系、基准轴或基准平面，还可以用来指定目标的位置，以利于辅助造型。单击造型界面右侧工具栏中的 【偏移坐标系】，打开【偏移坐标系基准点】对话框，如图 2-6 所示。鼠标左键单击造型区域中的坐标系，在【类型】一栏选择【笛卡尔】，然后输入基准点的坐标，单击【确定】，完成基准点的建立，如图 2-7 所示。

其他基准创建与此类似。



图 2-5　基准

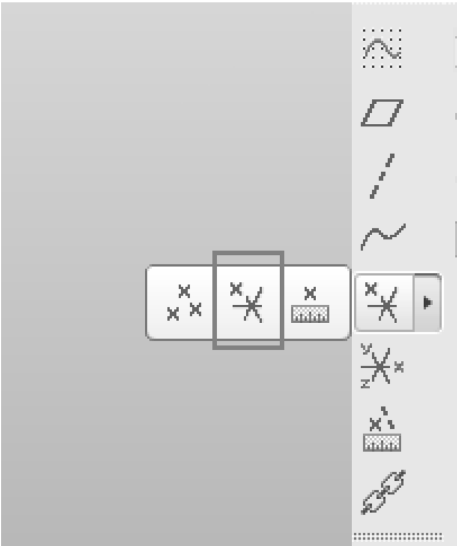


图 2-6　偏移坐标系

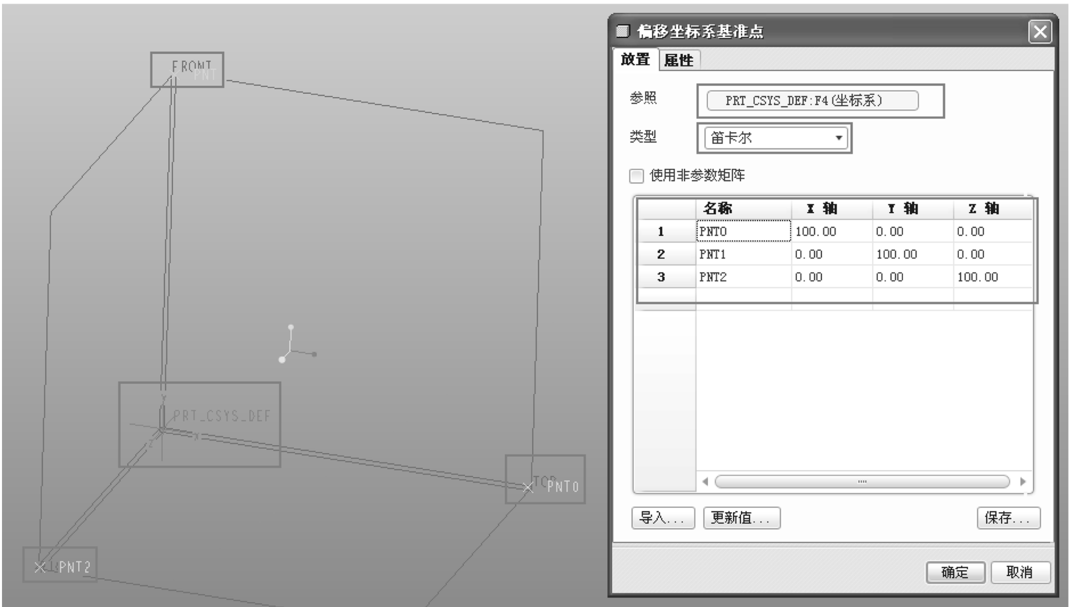


图 2-7　创建基准

2.1.4 创建样条曲线

单击造型界面右侧工具栏中的【曲线】图标，出现【菜单管理器】对话框，在【曲线选项】下选择【通过点】，单击【完成】，如图 2-8 所示。

在【连接类型】下选择【样条】，单击【单个点】→【添加点】，按住 Ctrl 键，鼠标左键依次单击造型区域中的点，单击【完成】，如图 2-9 所示。



图 2-8 创建曲线

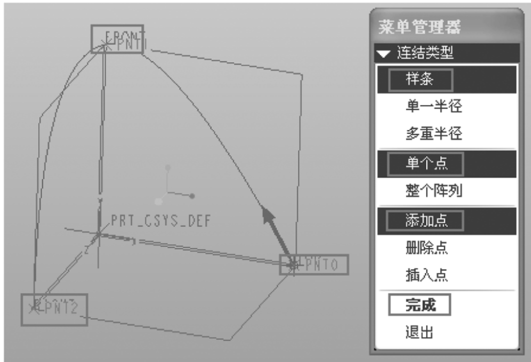


图 2-9 拾取点

单击【曲线：通过点】对话框中的【确定】按钮，完成样条曲线的建立，如图 2-10 所示。

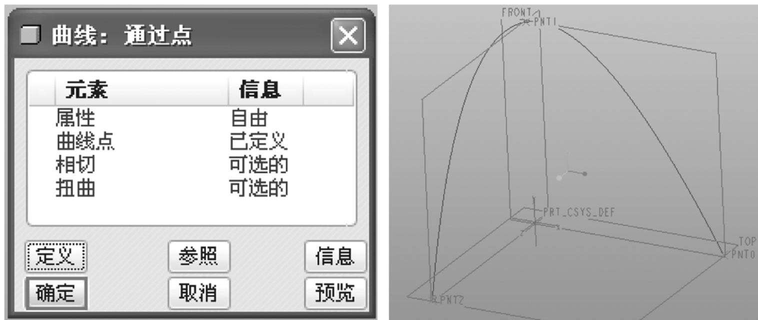


图 2-10 建立样条曲线

2.1.5 边界混合特征

叶片泵结构存在各种各样的曲面，这些曲面的造型都是通过边界混合特征实现的。

单击造型界面右侧工具栏中的【边界混合】按钮，打开【边界混合】控制面板，激活第一方向，按住 Ctrl 键，鼠标左键依次单击造型区域中的曲线，如图 2-11 所示。

激活第二方向，按住 Ctrl 键，鼠标左键依次单击造型区域中的两侧曲线，如图 2-12 所示。

单击按钮，完成边界混合特征，如图 2-13 所示。

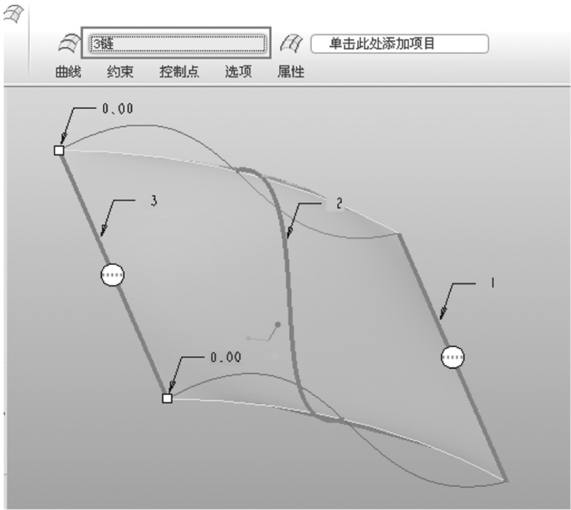


图 2-11　选取第一方向曲线

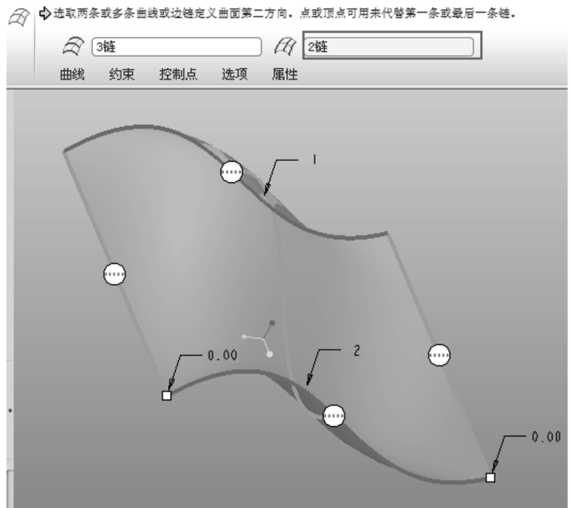


图 2-12　选取第二方向曲线

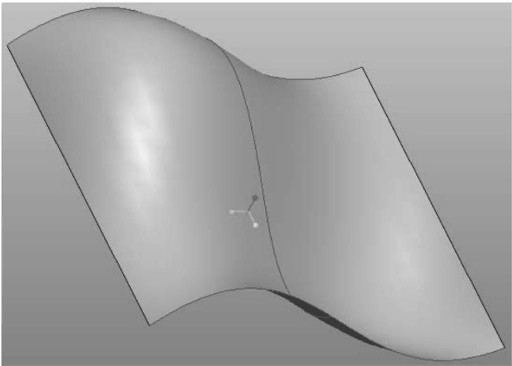


图 2-13　边界混合创建曲面

2.1.6 拉伸特征

拉伸特征是生成三维模型最常用的一种方法，其原理是将二维剖面沿法向延长一定长度。单击造型界面右侧工具栏中的【拉伸】按钮，打开【拉伸】控制面板，如图 2-14 所示。：拉伸为实体；：拉伸为曲面；：拉伸方式选项；216.51：深度值输入框；：切换拉伸方向；：去除材料。



图 2-14 启动拉伸命令

打开【放置】选项卡，单击【定义】，选取一个基准面作为草绘平面，单击【草绘】进入草绘界面，如图 2-15 所示。

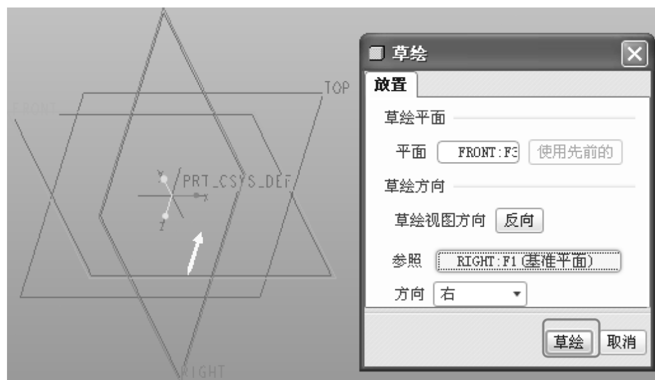


图 2-15 选择草绘平面

在草绘平面内绘制一个矩形线框，单击按钮，退出草绘界面，如图 2-16 所示。

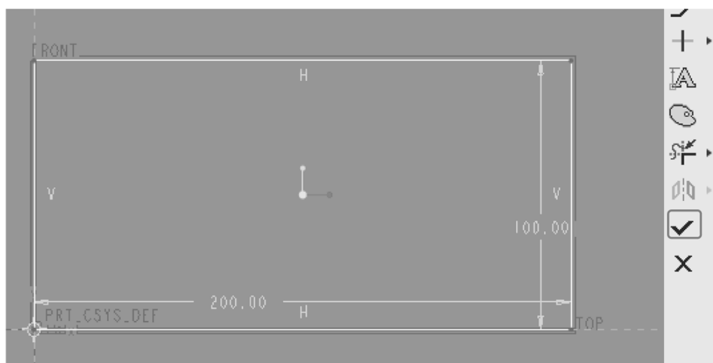


图 2-16 草绘

输入拉伸深度值，单击✓按钮，完成拉伸特征，如图 2-17 所示。

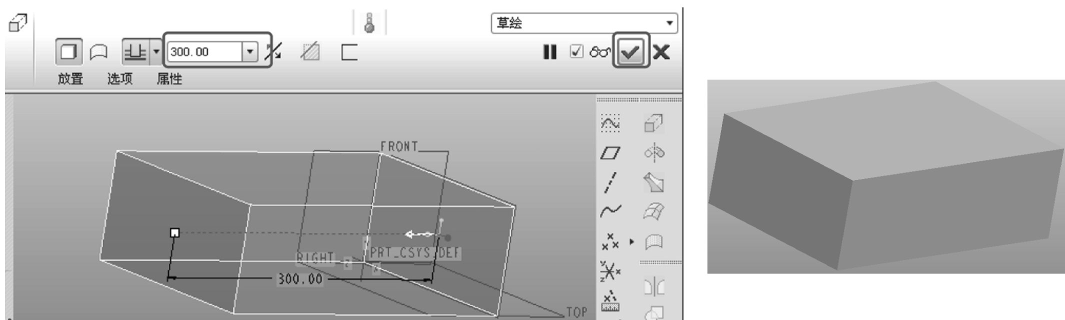


图 2-17　拉伸特征

2.1.7　旋转特征

旋转特征是将草绘截面绕旋转中心线旋转一定角度生成特征。总体而言，旋转特征与拉伸特征比较类似。单击造型界面右侧工具栏中的【旋转】按钮，打开【旋转】控制面板，如图 2-18 所示。：旋转为实体；：旋转为曲面；：旋转方式选项；360.00：输入旋转角度；：切换旋转方向；：去除材料。

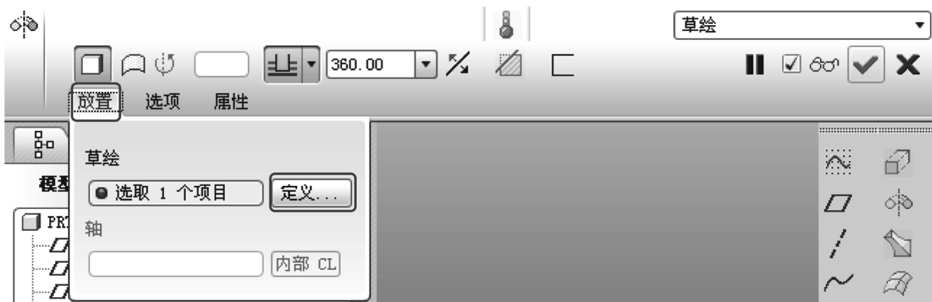


图 2-18　启动旋转命令

打开【放置】选项卡，单击【定义】按钮，选取一个基准面作为草绘平面，单击【草绘】进入草绘界面，如图 2-19 所示。

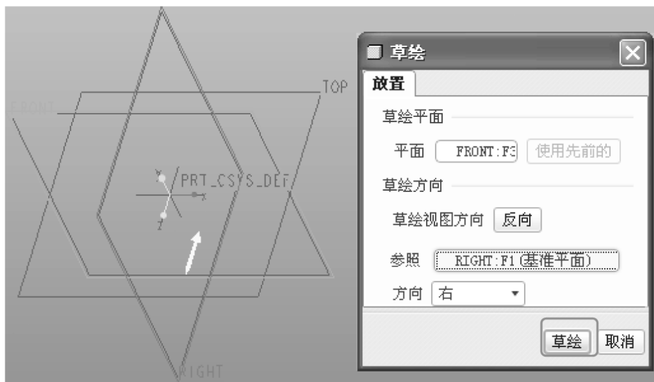


图 2-19　选择草绘平面

在草绘平面内绘制一个圆，单击✓按钮，退出草绘界面，如图 2-20 所示。

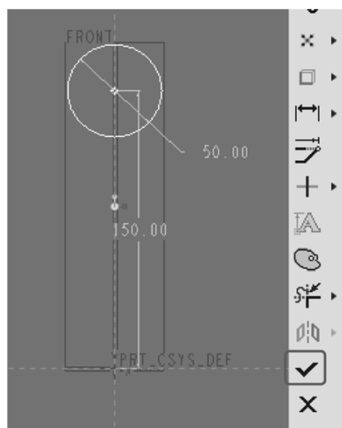


图 2-20　草绘

选取旋转轴，输入旋转角度值，单击✓按钮，完成旋转特征，如图 2-21 所示。

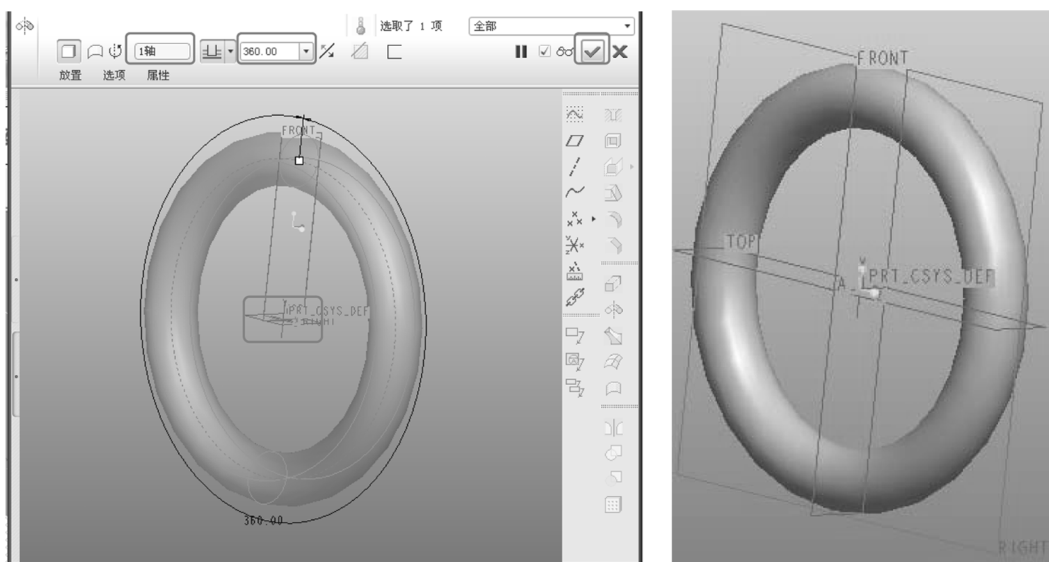


图 2-21　旋转特征

2.1.8　倒圆角特征

倒圆角是一种边处理方法，它在边上或曲面之间创建出平滑过渡的圆曲面。

单击造型界面右侧工具栏中的【倒圆角】按钮，选择需要倒圆角的边，输入倒圆角半径值，点击✓按钮，完成倒圆角特征，如图 2-22 所示。

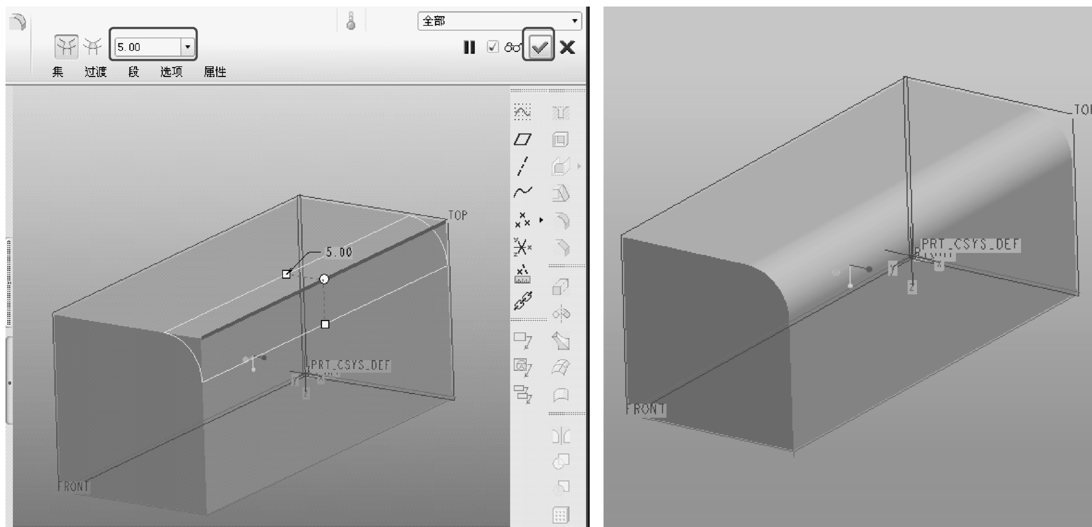


图 2-22　倒圆角特征

2.1.9　阵列特征

阵列特征是以某个原始特征为参照，复制出多个相同的特征，并能使特征按照一定的规律进行排列。轴阵列是以某条轴为旋转轴，每旋转一定角度复制一个特征的操作，叶轮叶片阵列正是由此特征来完成的。

首先选中需要阵列的特征，单击造型界面右侧工具栏中的▦【阵列】按钮，启动阵列命令，如图 2-23 所示。

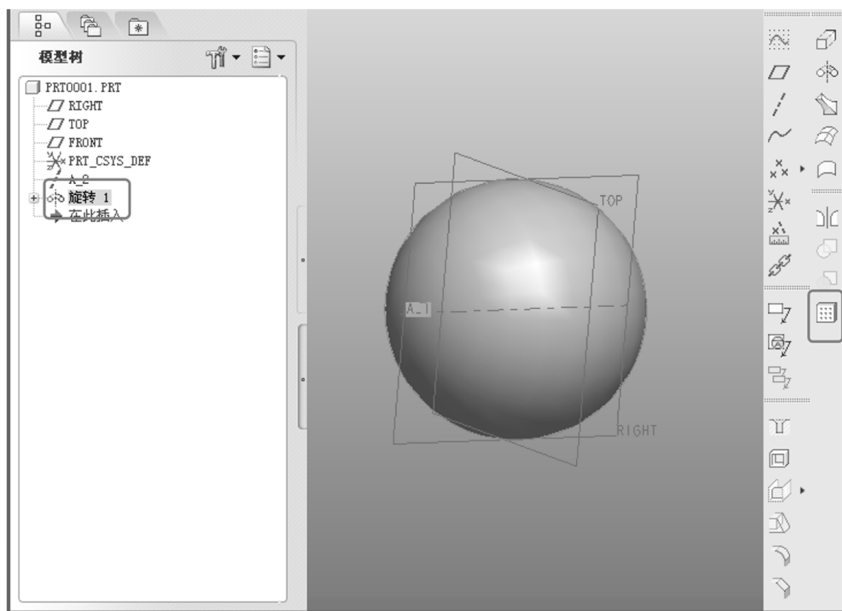


图 2-23　启动阵列命令

阵列类型选择【轴】，选取基准轴，输入阵列数量与角度间隔，单击按钮，完成轴阵列特征，如图 2-24 所示。

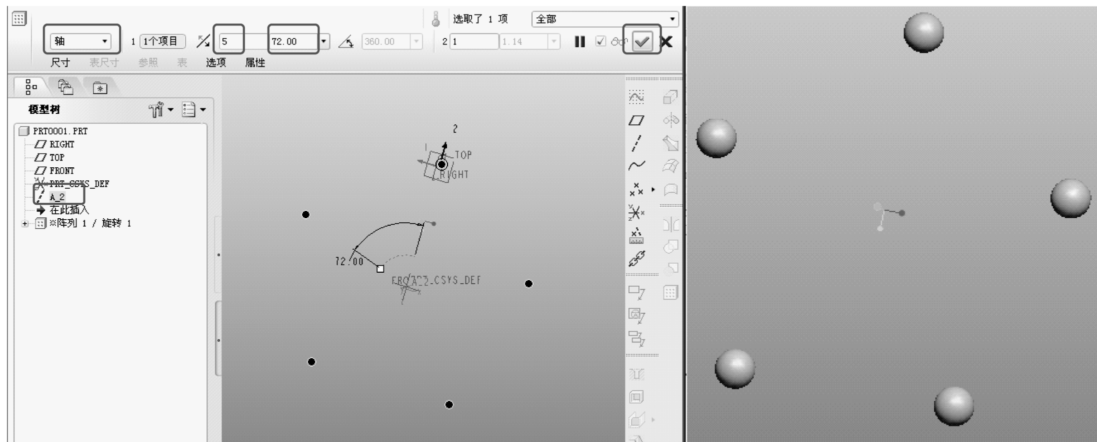


图 2-24　阵列特征

2.2　离心泵造型

2.2.1　叶轮水体造型

（1）建立叶片 prt 文件

启动 Pro/E，进入界面后，单击【新建】命令按钮，出现如图 2-25 所示对话框。【类型】栏选择【零件】，【子类型】栏选择【实体】，在【名称】栏输入 blade，取消【使用缺省模板】前的对勾，单击【确定】按钮，如图所示，【模板】栏选择 mmns_ part_ solid 模板，单击【确定】，进入造型界面。



图 2-25　建立叶片 prt 文件

（2）建立基准轴

单击造型界面右侧的 【基准轴】命令按钮，弹出对话框后选择 Z 轴，如图 2-26 所示，单击【确定】按钮，完成基准轴的建立。



图 2-26　建立基准轴

（3）绘制叶片工作面及背面

本书介绍两种绘制方法：旋转法和打点法。

1）旋转法

① 整理叶片木模图

在 AutoCAD 中对离心泵叶片木模图进行整理，保留叶轮轴面截线、叶片工作面木模截线、背面木模截线以及轴线。此外还要绘制一条叶轮中心线，最后把图形缩放成 1∶1。整理的最终效果如图 2-27 所示，将工作面与背面分别保存两个文件，文件类型为＊.dwg。建议保存为 AutoCAD 2004 版本的文件。

② 导入叶片工作面木模图

单击造型界面右侧的 【草绘】命令按钮，弹出对话框，如图 2-28 所示，在【草绘平面】的【平面】选择 TOP 平面，【草绘方向】的【方向】选择底部，其他为默认值，单击【草绘】进入草绘界面。单击菜单栏【草绘】→【数据来自文件】→【文件系统】，弹出如图 2-29 所示对话框，找到之前整理的叶片工作面木模图文件，单击【打开】按钮，弹出信息窗口单击【关闭】按钮。在草绘区域的任意位置单击鼠标左键，导入木模图。

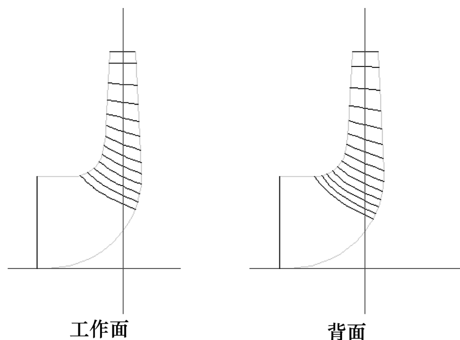


图 2-27　叶片木模图



图 2-28　【草绘】对话框



图 2-29　导入木模图

在导入的草绘图形中有一个白色的小圆圈，鼠标右键单击该小圆圈，拖动至轴线与中间线的交点处。然后，鼠标左键单击该小圆圈，拖动至草绘界面的原点处，如图 2-30 所示。

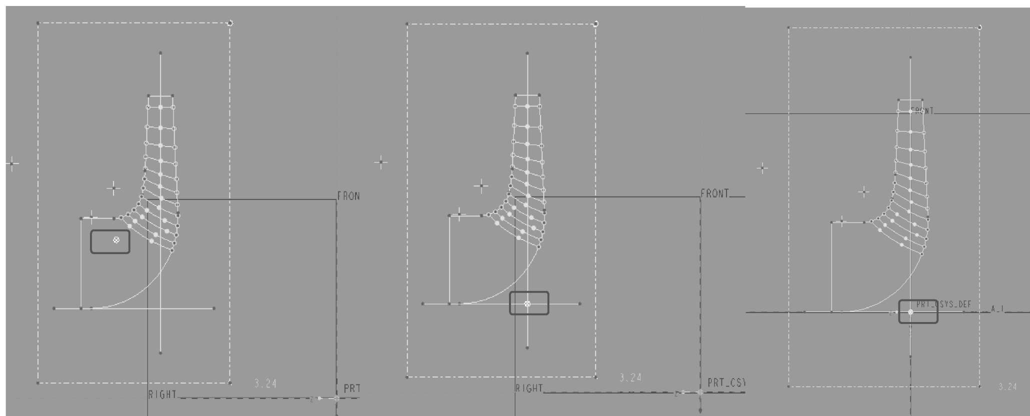


图 2-30　调整木模图位置

【移动和调整大小】中【旋转/缩放】的【缩放】输入 1，如图 2-31 所示，单击对话框下端的 ✓ 按钮，完成图形的导入。然后单击草绘界面右侧的 ✓ 按钮，完成叶片工作面的草绘，结果如图 2-32 所示。

③ 旋转各个木模截线至相应位置

单击造型界面右侧的【旋转】命令，在旋转对话框中选中【曲面】按钮，选中【放置】标签，在展开的对话框中单击【定义】按钮，如图 2-33 所示。弹出【草绘】对话框后，在造型区域内单击 TOP 基准面，然后单击对话框中的【草绘】按钮，进入草绘界面。



图 2-31　调整木模图比例

单击草绘界面右侧的【使用边】，弹出对话框后，

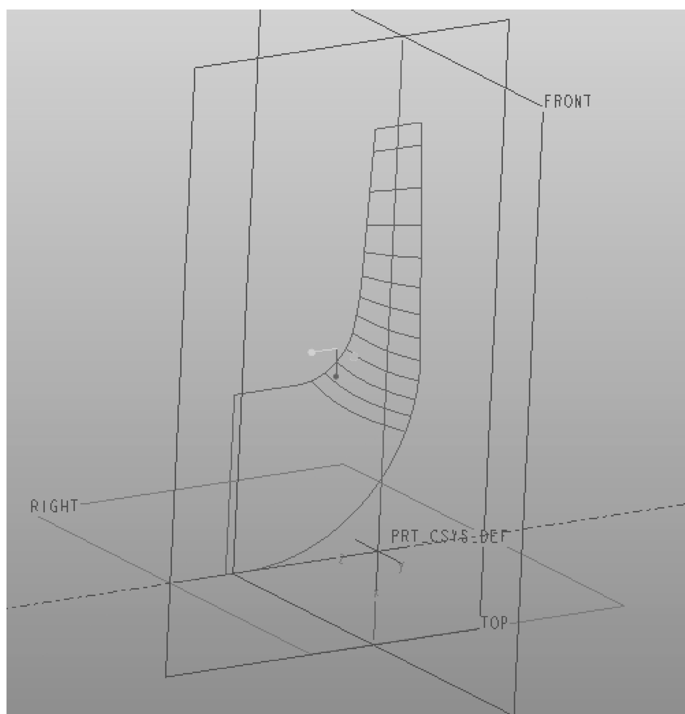


图 2-32　导入木模图后的界面

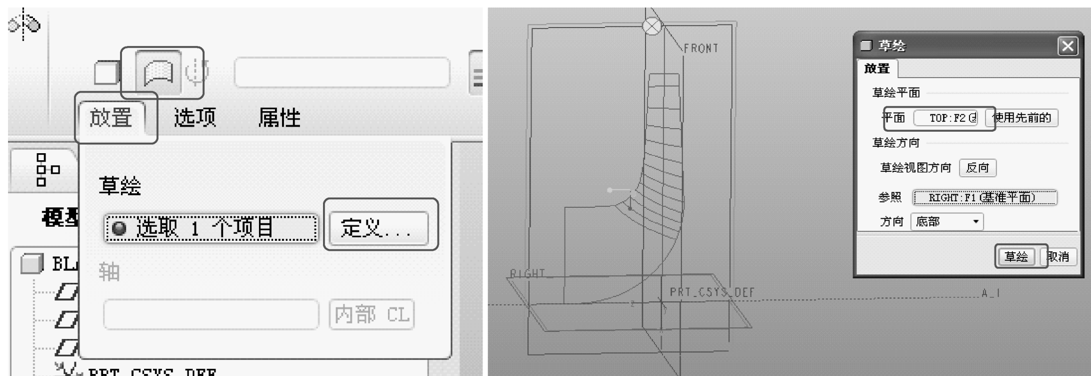


图 2-33　【旋转】对话框

鼠标左键选取叶片进口处第二条木模截线，单击类型对话框里的【关闭】按钮，然后单击草绘界面右侧的✔按钮，完成草绘，如图 2-34 所示。

在造型界面中选取之前建立的基准轴，旋转角度输入 10，如图 2-35 所示。单击☑按钮，完成旋转操作。

重复本步骤，完成其余木模截线的旋转。要根据叶轮的旋转方向来确定截线旋转方向。本例叶轮的旋转方向为从进口方向看逆时针旋转，具体旋转角度要根据木模图来确定。本例中每条木模截线相隔 10°，故旋转角度输入 10，其余木模截线旋转角度依次累加，叶片工作面出口边的旋转角度应与包角一致（本书模型包角为 115°），旋转完成后结果如图 2-36 所示。

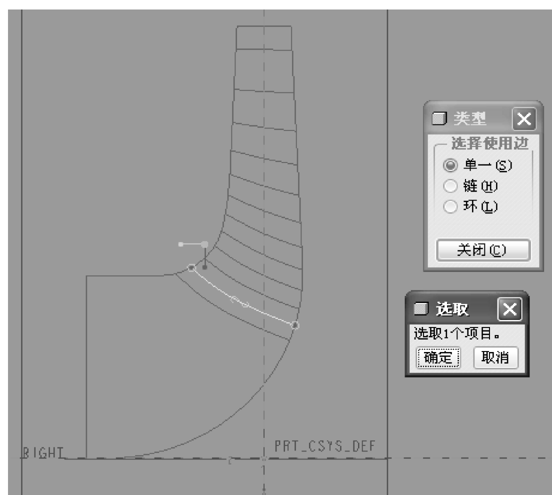


图 2-34　草绘

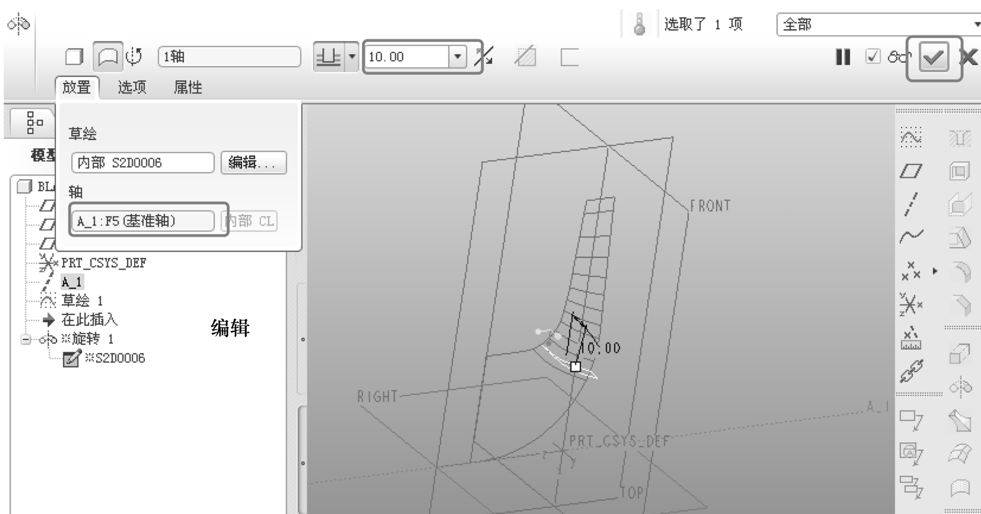


图 2-35　旋转轴与旋转角度

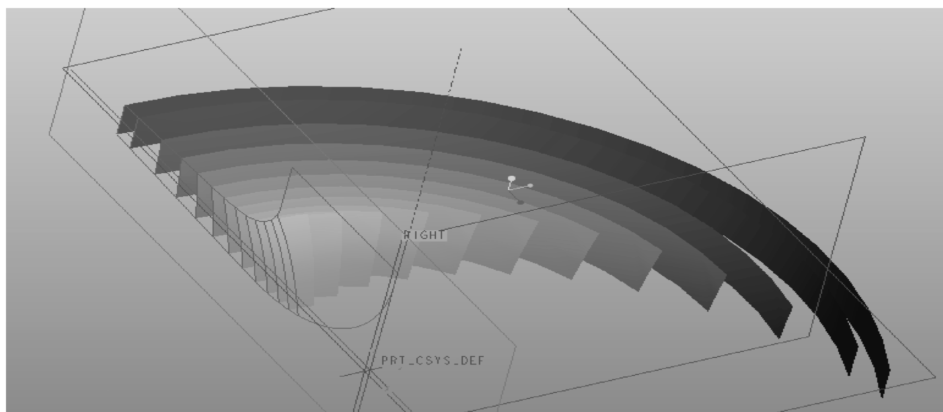


图 2-36　旋转最终效果

④ 绘制叶片工作面

单击造型界面右侧的【边界混合】按钮，依次选择（Ctrl + 鼠标左键）上一步旋转面的边界（包括叶片工作面进口边，从工作面进口边依次选择一直到出口边为止），如图 2-37 所示，单击按钮，完成叶片工作面的造型。

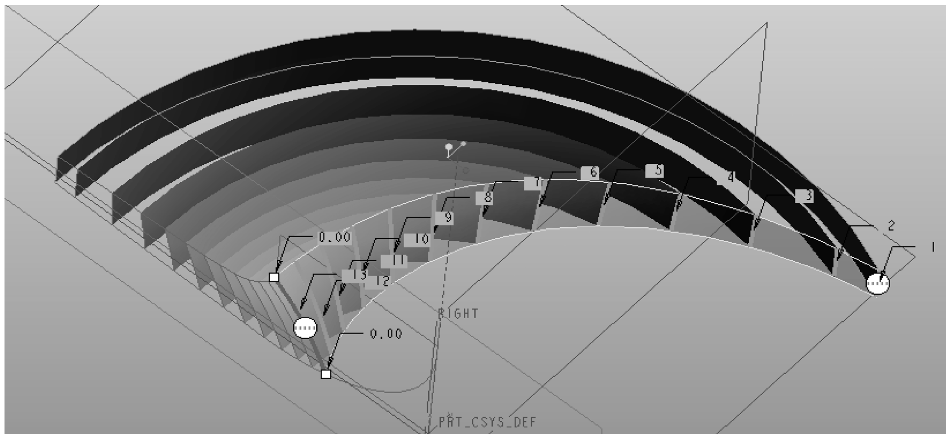


图 2-37　边界混合

选中造型界面左侧模型树中的旋转特征，单击鼠标右键，选择【隐藏】命令，如图 2-38所示。此时，造型界面上仅显示叶片工作面，隐藏后结果如图 2-39 所示。

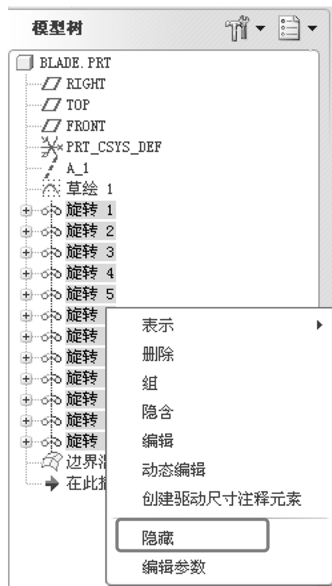


图 2-38　隐藏

⑤ 叶片背面造型

重复上述步骤，完成叶片背面的造型，结果如图 2-40 所示。

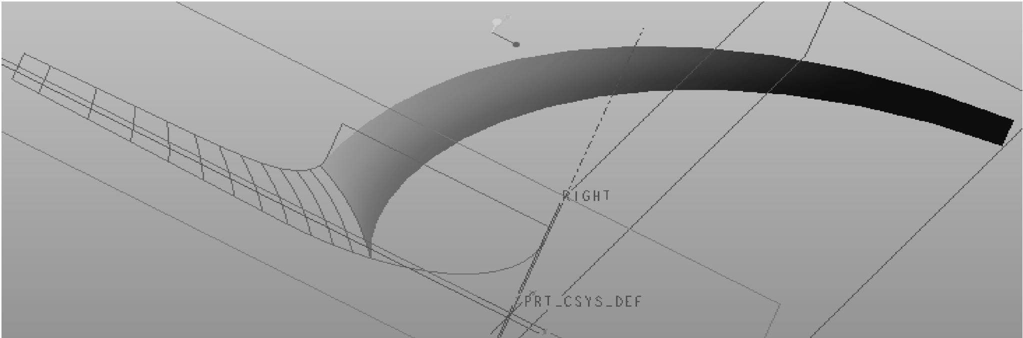


图 2-39　叶片工作面

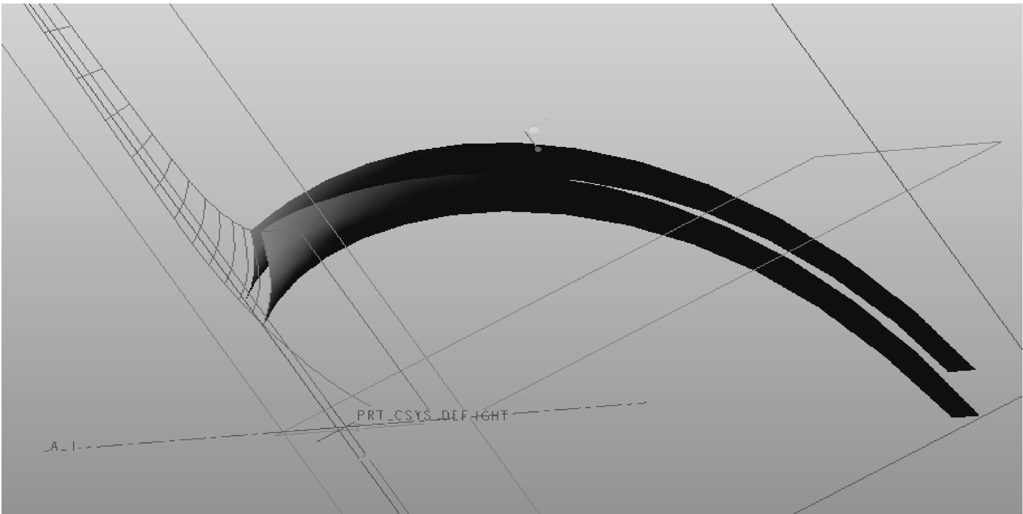


图 2-40　叶片工作面与背面

2）打点法

使用打点法需要整理叶片工作面及背面上各点的坐标值，此坐标值为柱坐标系中的坐标值，即径向坐标 R、角度坐标 θ、轴向坐标 Z。叶片木模图中有工作面和背面各点的数据表，如图 2-41 所示为工作面数据表。

工作面

角　度	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
前盖板	35.9	37.1	38.9	41.4	44.3	47.6	51.2	55.3	59.9	65.3	71.8	79.6
1	32.2	36.1										
2	29.3	32.8	36.7	40.7								
3	27	30.4	34	37.9	41.9	45.9	50	54.5	59.4	65.1	71.7	79.5
4	25	28.4	31.9	35.7	39.7	43.9	48.3	53.1	58.4	64.4	71.4	79.5
5	23.4	26.7	30.2	33.9	37.9	42.2	46.8	51.9	57.5	63.9	71.1	79.5
后盖板	23	25.9	29.1	32.6	36.6	41	45.8	51.1	57	63.6	71	79.5

图 2-41　叶片工作面数据表

如图所示，各点的 R 值与 θ 值可以直接读取，而 Z 值并不是表中的数据，表中的 1、2、3、4、5 是轴面截线的序号，并不是轴向距离。所以，需要在叶片的轴面投影图中确定轴向的基准，即 $Z=0$ 的位置，再测量 Z 的大小，如图 2-42 所示，要注意 Z 值的正负之分，规定在基准左侧点的 Z 值为负，而在右侧点的 Z 值为正。

图 2-42　轴向基准的确定

单击造型界面右侧的【偏移坐标系】按钮，弹出【偏移坐标系基准点】对话框，【参照】对话框中选择造型界面的坐标系，【类型】对话框中选择圆柱，将叶片木模图中的数据整理成圆柱坐标的形式，将工作面 0°上各点的坐标输入对话框中，如图 2-43 所示。单击【确定】按钮，完成操作。

重复此过程，输入工作面其他角度上的点，完成打点的结果如图 2-44 所示。

图 2-43　偏移坐标系

图 2-44　叶片工作面上的点

① 绘制木模截线

单击造型界面右侧的【曲线】按钮，弹出对话框，在【曲线选项】一栏选择【通过点】，单击【完成】按钮。在【连接类型】一栏选择【样条】【整个阵列】，选择【添加点】，鼠标左键在造型区域内选取 0 度木模截线上的第一个点，如图 2-45 所示，单击【完成】按钮。单击【曲线】对话框中的【确定】按钮，完成操作。



图 2-45 插入基准曲线

重复此过程，完成工作面所有木模截线的绘制，如图 2-46 所示。

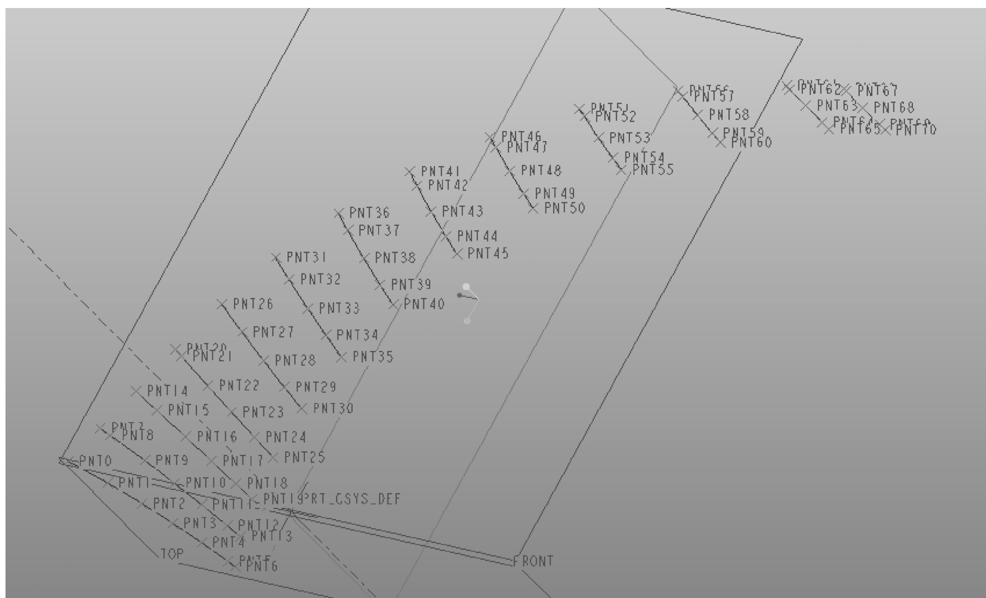


图 2-46 叶片工作面上的木模截线

② 绘制叶片工作面

单击造型界面右侧的【边界混合】按钮，依次选取上一步绘制的木模截线，如图 2-47 所示，单击按钮，完成叶片工作面的造型。

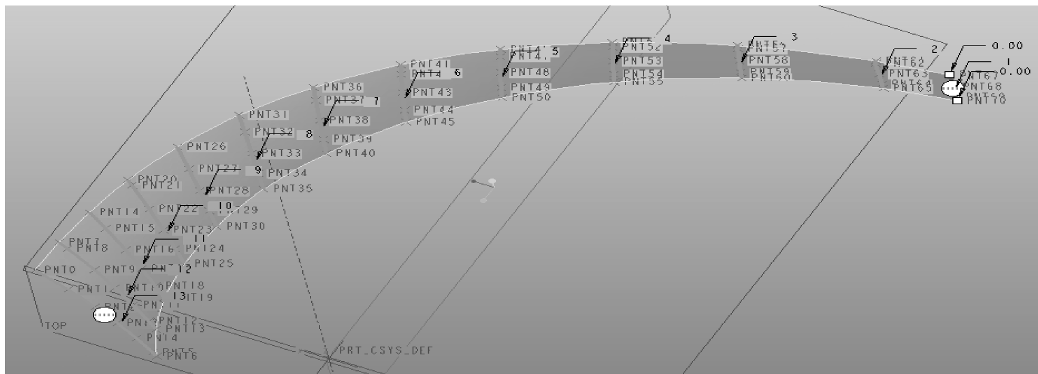


图 2-47 边界混合

选中造型界面左侧模型树中的基准点与曲线特征，单击鼠标右键，选择【隐藏】命令。此时，造型界面上仅显示叶片工作面，如图 2-48 所示。

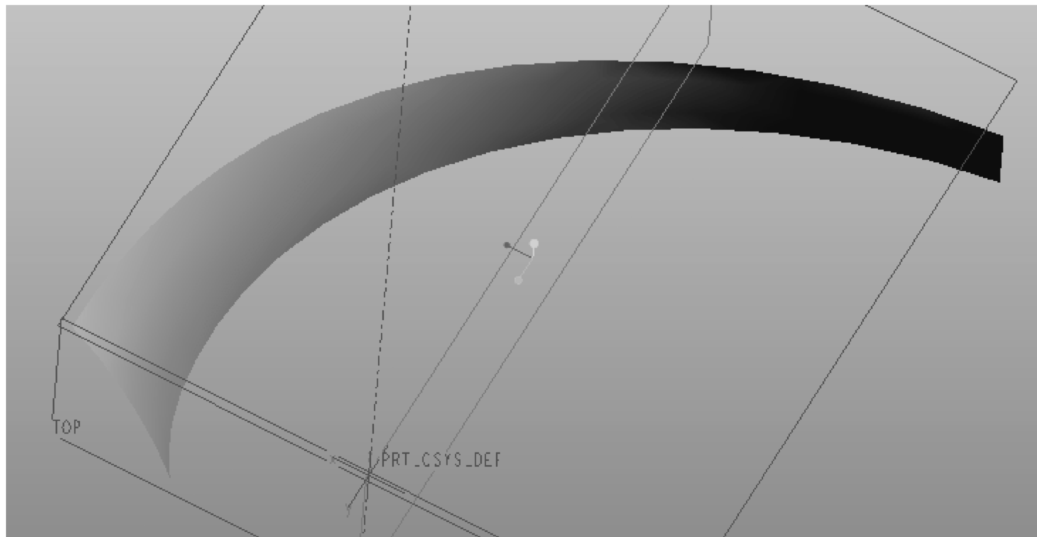


图 2-48　叶片工作面

③ 叶片背面造型

重复上述步骤，完成叶片背面的造型。如图 2-49 所示。

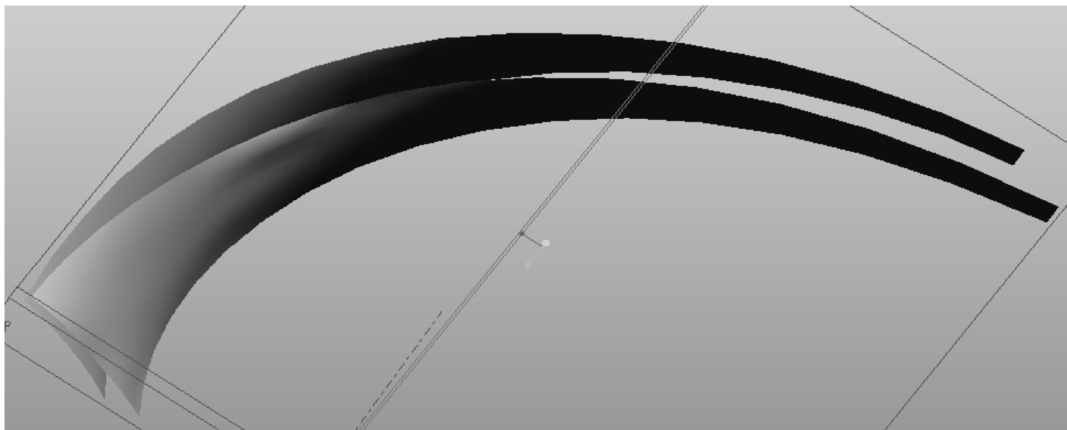


图 2-49　叶片工作面与背面

（4）曲面延伸

单击鼠标左键选中工作面与前盖板的交接边，单击菜单【编辑】→【延伸】，延伸长度输入 1，如图 2-50 所示，单击按钮，完成操作。重复此步骤，对工作面与后盖板的交接边、背面与前盖板的交接边、背面与后盖板的交接边都延伸 1mm（除了工作面和背面的进口边不延伸，其他边都需要延伸。延伸的目的是为了后面进行曲面合并时，叶片能够与前后盖板曲面完全贴合，此处延伸的长度对于造型结果没有影响，建议延伸长度取 1～2mm）。

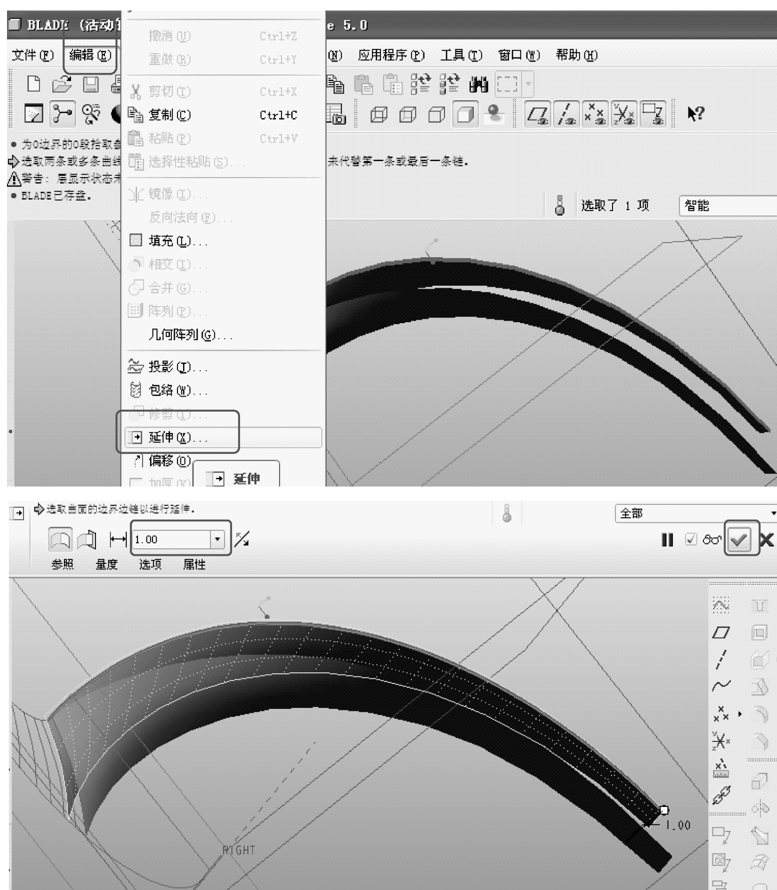


图 2-50　曲面延伸

（5）绘制叶片进口

单击造型界面右侧的【边界混合】，选取工作面进口边与背面进口边，如图 2-51 所示，单击按钮，完成叶片进口的造型。

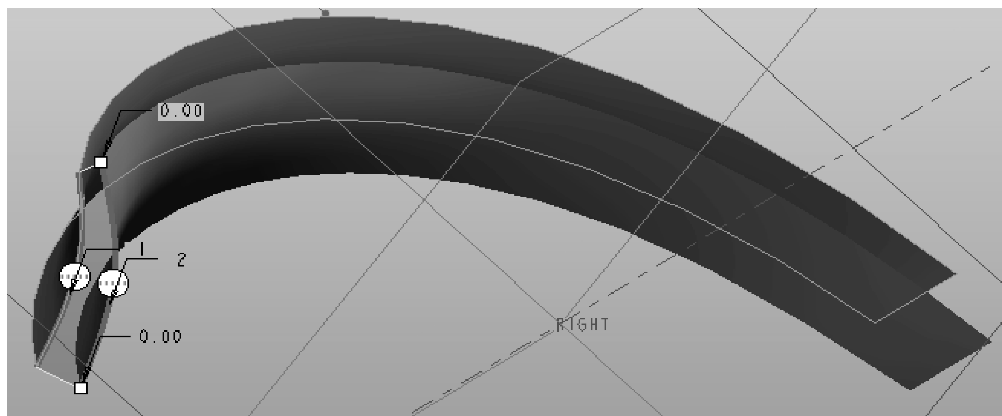


图 2-51　叶片进口边

（6）绘制叶轮前后盖板及出口

单击造型界面右侧的【旋转】按钮，在【旋转】对话框中选中【曲面】，单击【放置】，在展开的对话框中单击【定义】。弹出【草绘】对话框后，在造型区域内单击 TOP 基准面，然后单击对话框中的【草绘】，进入草绘界面。导入叶轮轴面投影图，方法如步骤（3），单击草绘界面右侧的【使用】按钮，弹出对话框后，选取前后盖板及出口边，单击类型对话框里的【关闭】按钮，然后单击草绘界面右侧的按钮，完成草绘。在造型界面选取之前建立的基准轴，旋转角度输入 360，单击按钮，完成旋转操作，结果如图 2-52 所示。

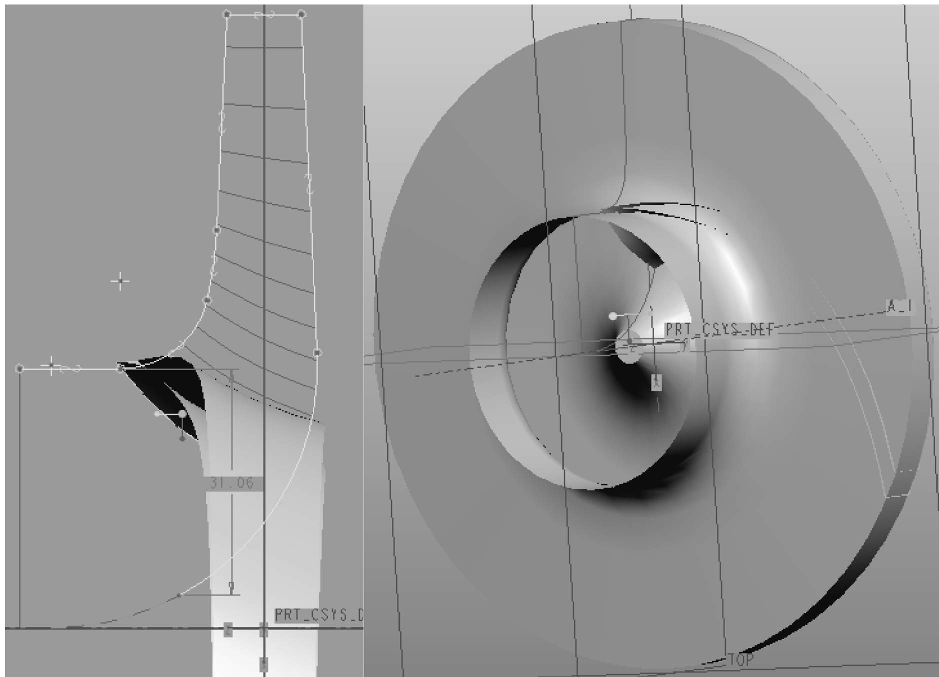


图 2-52　旋转前后盖板

（7）曲面合并

选中叶片工作面、叶片进口面与背面，单击菜单【编辑】→【合并】，如图 2-53 所示，单击按钮，完成操作。

选中此合并特征与上一步的旋转面，单击菜单【编辑】→【合并】，调整图中两个黄色箭头的方向，保留叶片的所有表面，单击按钮完成操作，最终效果如图 2-54 所示。

（8）叶片实体化

选中合并后的叶片，单击菜单【编辑】→【实体化】，如图 2-55 所示，单击按钮，完成操作，看是否合并成功，可以将模型调整为线框显示形式，如果线条都是白色就说明模型为实体，如果为彩色线条则为曲面。

（9）叶片进口边倒圆角

单击造型界面右侧的【倒圆角】按钮，选择叶片进口处的两条边，圆角半径值设置为 1. 5（根据实际情况而定），如图 2-56 所示，单击按钮完成操作。单个叶片最终效果如

图 2-57 所示。

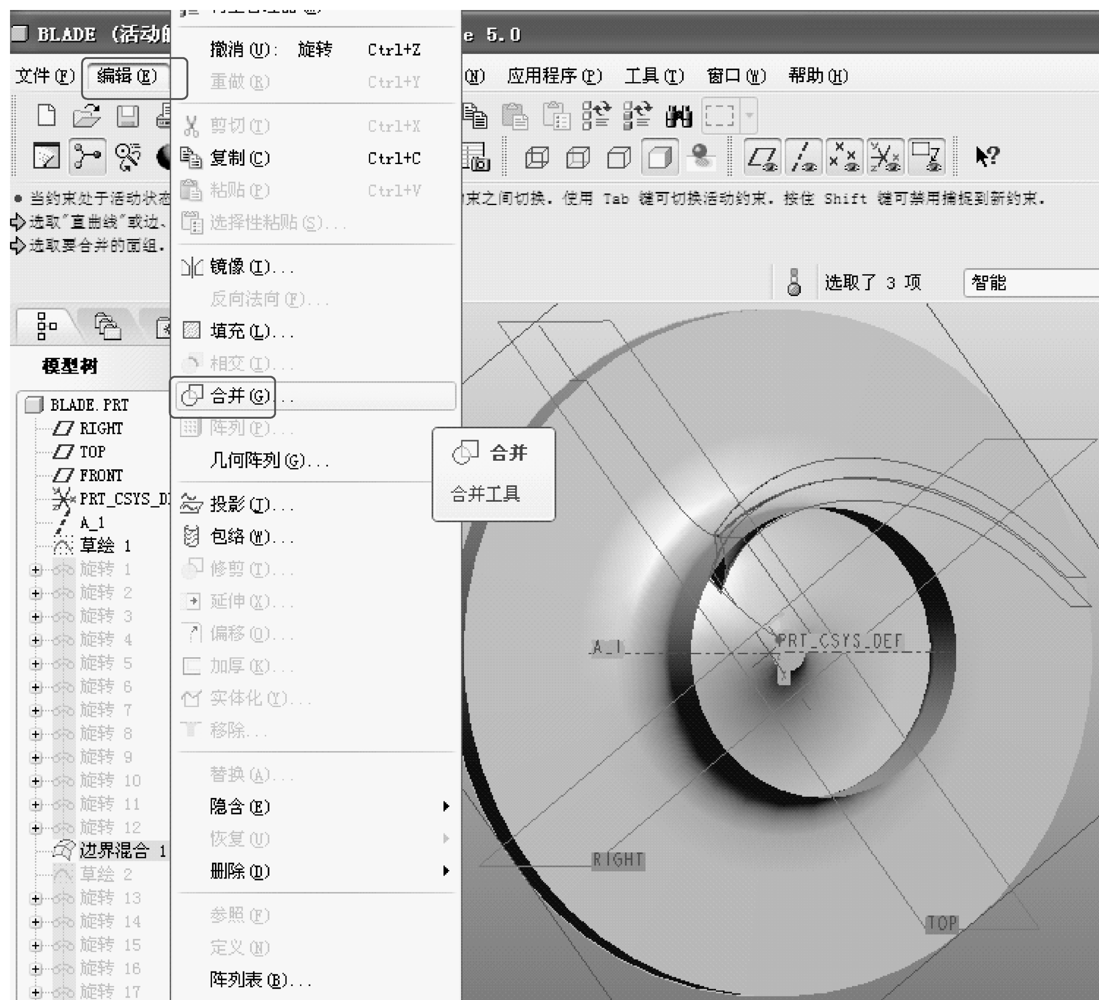


图 2-53 【曲面合并】对话框

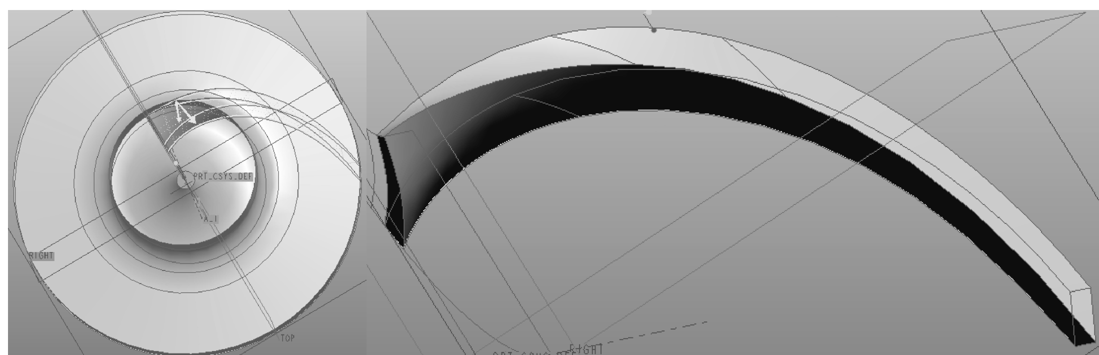


图 2-54 完成曲面合并



图 2-55　实体化

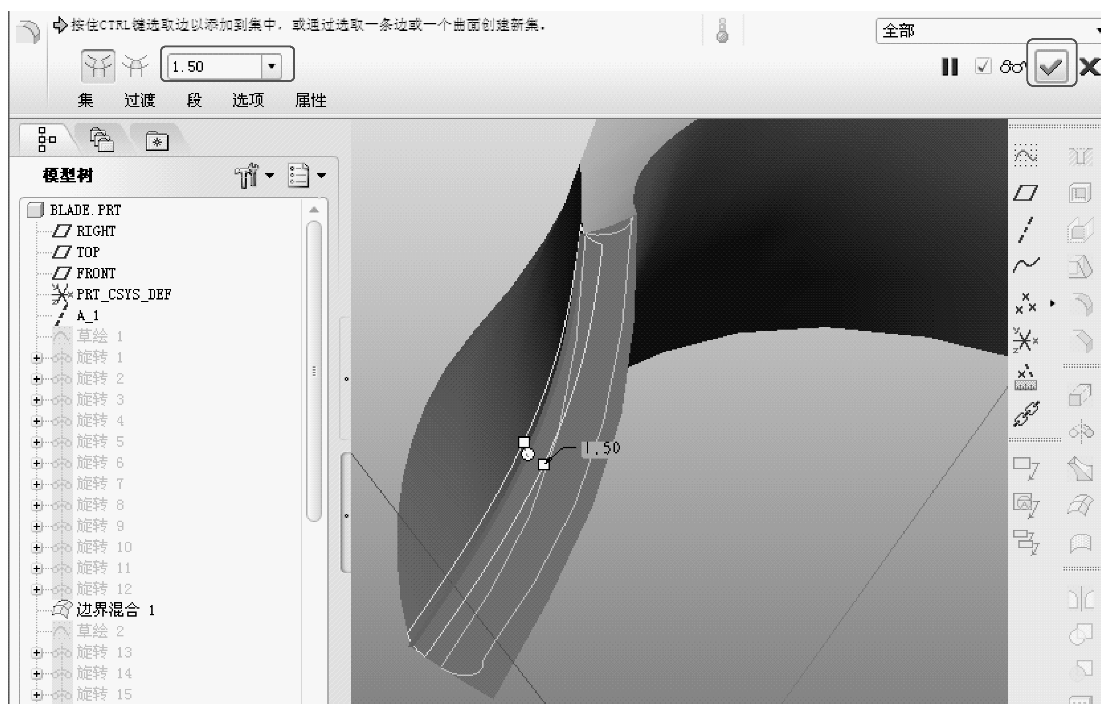


图 2-56　叶片进口边倒圆角

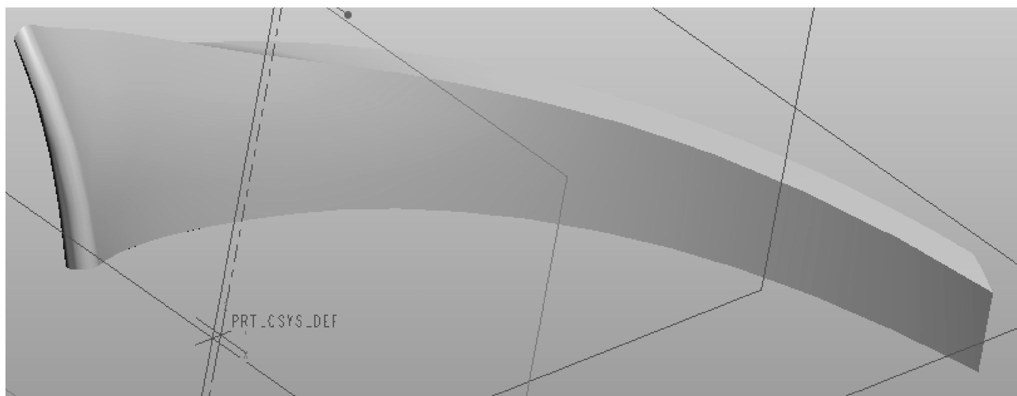


图 2-57　单个叶片

（10）叶片阵列

选中造型界面左侧模型树中的所有特征，单击鼠标右键，选择【组】，如图 2-58 所示。选中该特征，单击造型界面右侧的【阵列】按钮，对话框中第一栏选取【轴】，选取之前建立的基准轴，设置阵列个数为 5（5 枚叶片），阵列角度范围 360，如图 2-59 所示。单击按钮完成操作。



图 2-58　创建组

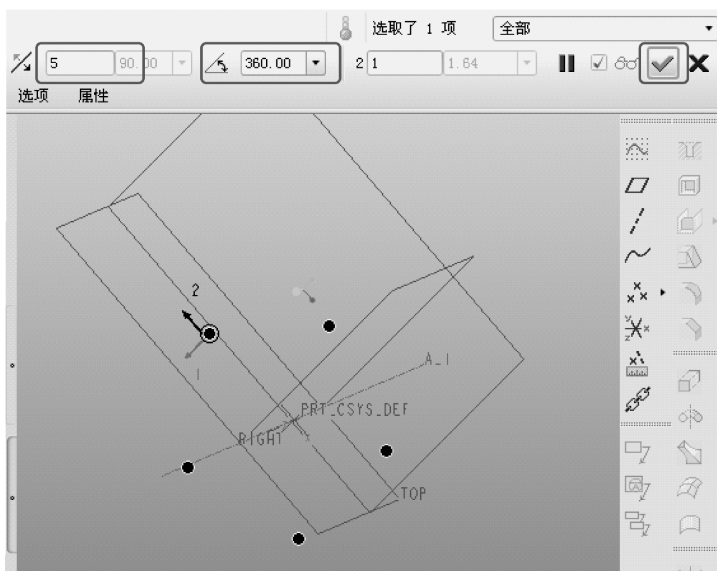


图 2-59　叶片阵列

（11）保存文件

至此，叶片的造型全部完成，单击【保存】按钮，保存文件。最终效果如图 2-60 所示。

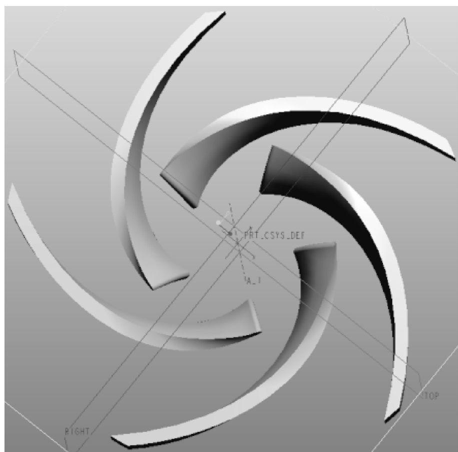


图 2-60　5 枚叶片

（12）建立叶轮水体 prt 文件

按照步骤（2），建立叶轮水体 prt 文件，文件名称取 imp_water。

（13）导入轴面投影图

参考旋转法导入 *. dxf 文件的步骤，将轴面投影图导入 Pro/E 中。

（14）绘制叶轮水体

单击造型界面右侧的【旋转】按钮，在【旋转】对话框中选中【实体】，单击【放置】，在展开的对话框中单击【定义】按钮。弹出【草绘】对话框后，在造型区域内选择 TOP 基准面，然后单击对话框中的【草绘】，进入草绘界面。绘制叶轮的轴面图，叶轮螺母简化成圆球，球径大小根据实际情况而定。草绘的图形一定要封闭，否则无法构建该特征。然后单击草绘界面右侧的按钮，完成草绘。在造型界面选取之前建立的基准轴，旋转角度输入 360。单击按钮，完成旋转操作，结果如图 2-61 所示。

（15）去除叶片

如图所示，单击菜单【插入】→【共享数据】→【合并/继承】，单击对话框中的【移除材料】，然后单击【打开】按钮，找到之前建立的 blade 文件，单击【打开】，如图 2-62 所示按钮。

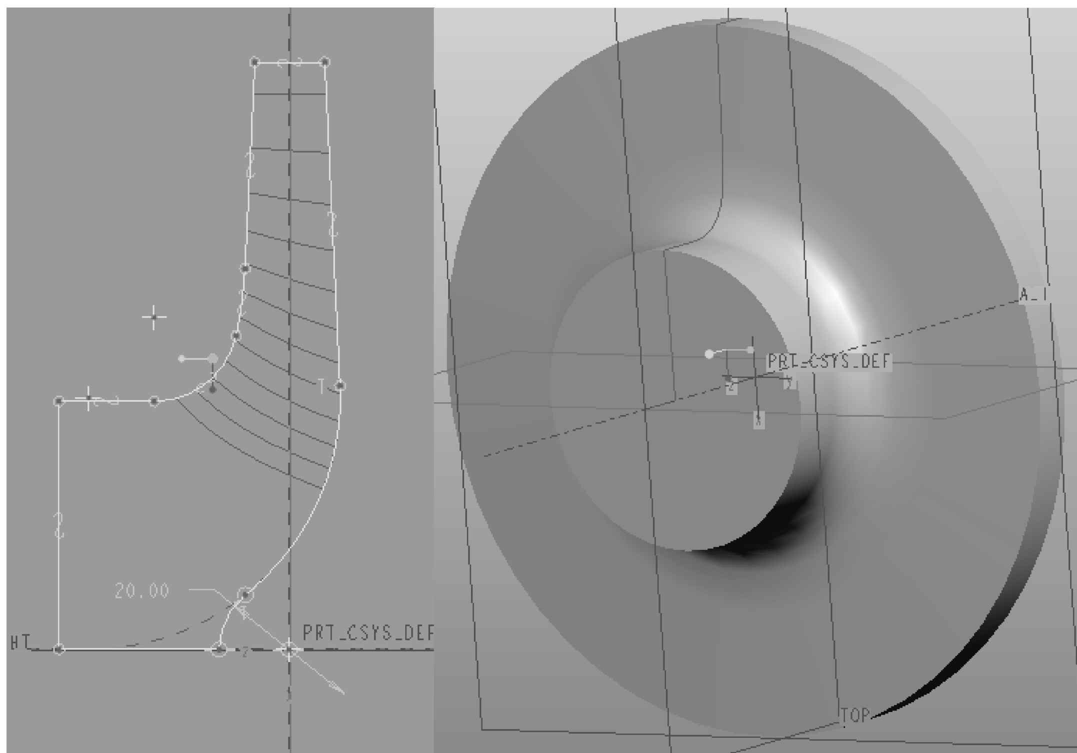


图 2-61　旋转叶轮水体



图 2-62　合并/继承

选取两个造型界面的坐标系，单击【外部切除】对话框的按钮，再单击造型界面上方的按钮，完成切除操作，结果如图 2-63 所示。

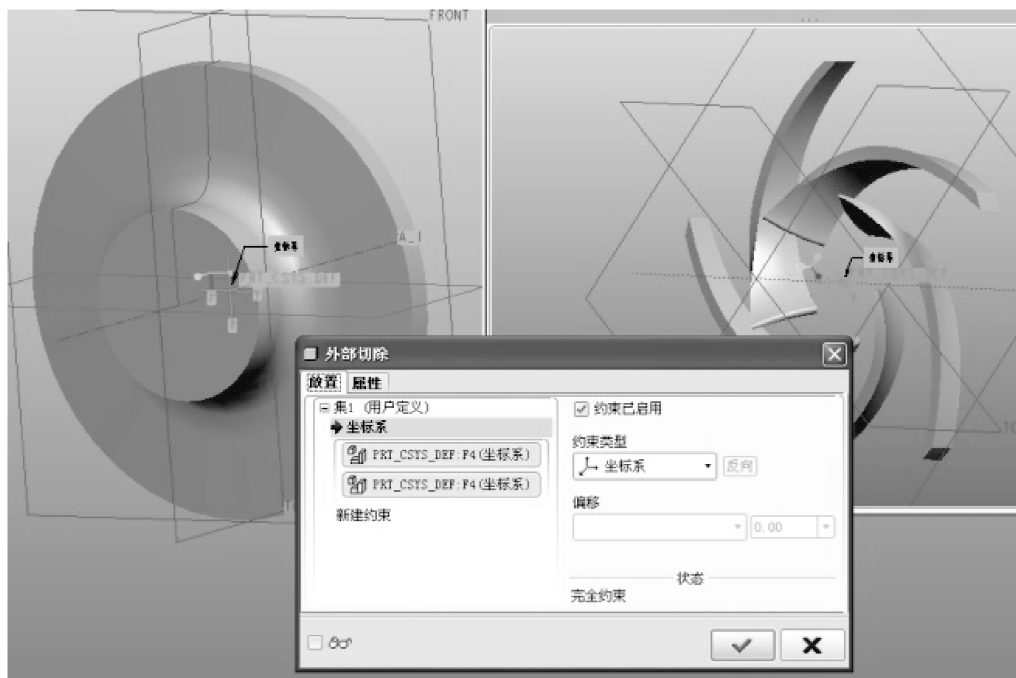


图 2-63　外部切除

（16）保存文件

至此，叶轮水体的造型全部完成，单击【保存】按钮，保存文件。最终结果如图 2-64所示。

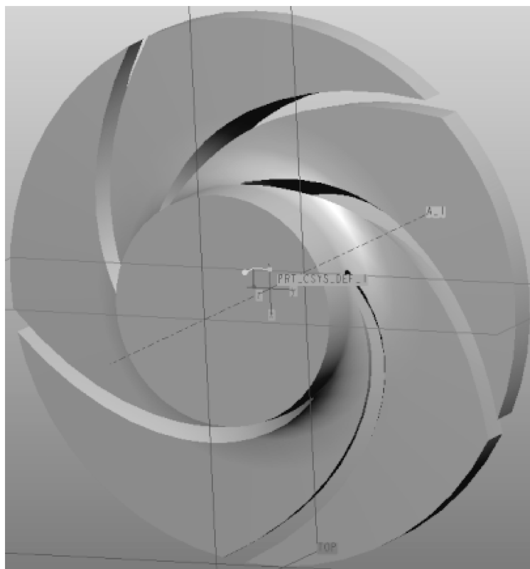


图 2-64　叶轮水体

2.2.2　蜗壳造型

（1）整理蜗壳水力图

在 AutoCAD 中对蜗壳水力图进行整理，保留蜗壳螺旋线、断面线和中心线，最后把图形缩放成 1∶1。整理的最终效果如图 2-65 所示，将其保存为 dwg 格式文件。各个断面线一定要与螺旋线相交，且不可超出螺旋线。

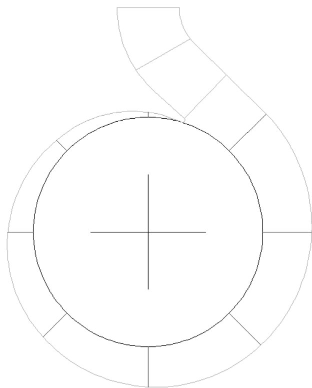


图 2-65　蜗壳水力图

（2）建立蜗壳水体 prt 文件

启动 Pro/E 软件，进入界面后，单击【新建】按钮，出现如图 2-66 所示对话框。在【类型】栏选择【零件】，【子类型】栏选择【实体】，在【名称】栏输入 vol_water，取消【使用缺省模板】前的对勾，单击【确定】按钮，如图所示，【模板】栏选择 mmns_part_solid 模板，单击【确定】按钮，进入造型界面。



图 2-66　建立蜗壳水体 prt 文件

（3）建立基准轴

单击造型界面右侧的【基准轴】按钮，弹出对话框后选择 Z 轴，如图 2-67 所示，单击【确定】按钮，完成基准轴的建立。

（4）导入蜗壳水力图

单击造型界面右侧的【草绘】按钮，弹出对话框，如图 2-68 所示，【草绘平面】的【平面】选择 FRONT 平面，【草绘方向】的【方向】选择右，其他为默认值，单击【草绘】按钮进入草绘界面。

单击菜单栏【草绘】→【数据来自文件】→【文件系统】，弹出如图 2-69 所示对话框，找到之前整理的蜗壳水力图文件，单击【打开】按钮，弹出信息窗口单击【关闭】按钮。

图 2-67　建立基准轴

图 2-68　草绘对话框

图 2-69　导入水力图

在草绘区域的任意位置单击鼠标左键，在导入的草绘图形中有一个白色的小圆圈，鼠标右键按住该小圆圈，拖动至中心点。然后，鼠标左键按住该小圆圈，拖动至草绘界面的原点处，如图 2-70 所示。

图 2-70　调整水力图位置

【移动和调整大小】中【旋转/缩放】的【缩放】输入 1，如图 2-71 所示，单击对话框下端的 ✓ 按钮，完成图形的导入。然后单击草绘界面右侧的 ✓ 按钮，完成蜗壳水力图的草绘，结果如图 2-72 所示。



图 2-71　调整水力图比例

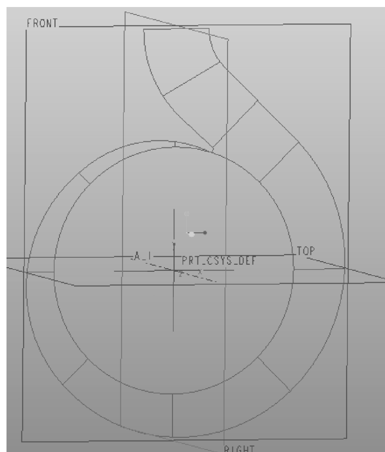


图 2-72　导入后的水力图

（5）绘制基圆

单击造型界面右侧的 【平面】按钮，弹出对话框后，在造型区域选中 FRONT 平面，在【偏移】下的【平移】对话框中输入 10（该数值为蜗壳进口宽度的一半，本例蜗壳进口宽度为 20mm），单击【确定】按钮，如图 2-73 所示。

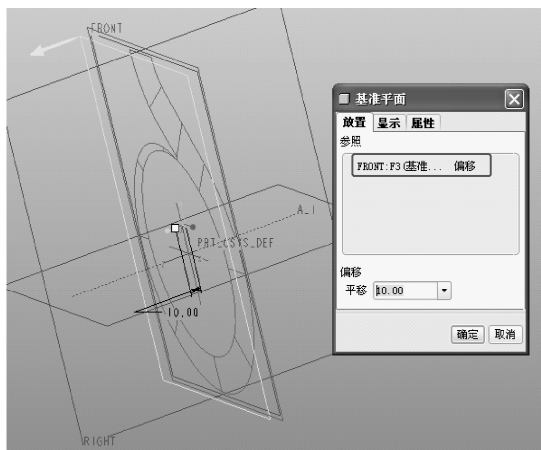


图 2-73　建立基准面

单击造型界面右侧的 【草绘】按钮，【草绘平面】的【平面】中选择刚建立的平面，单击【草绘】进入草绘界面。单击草绘界面右侧的 【圆】按钮，绘制基圆，然后单击草绘界面右侧的 ✓ 按钮，完成基圆的草绘，结果如图 2-74 所示。

在造型区域选中刚绘制的基圆，再单击右侧的 【镜像】按钮，弹出对话框后，选取 FRONT 平面，单击 ✓ 按钮，完成镜像操作，最终效果如图 2-75 所示。

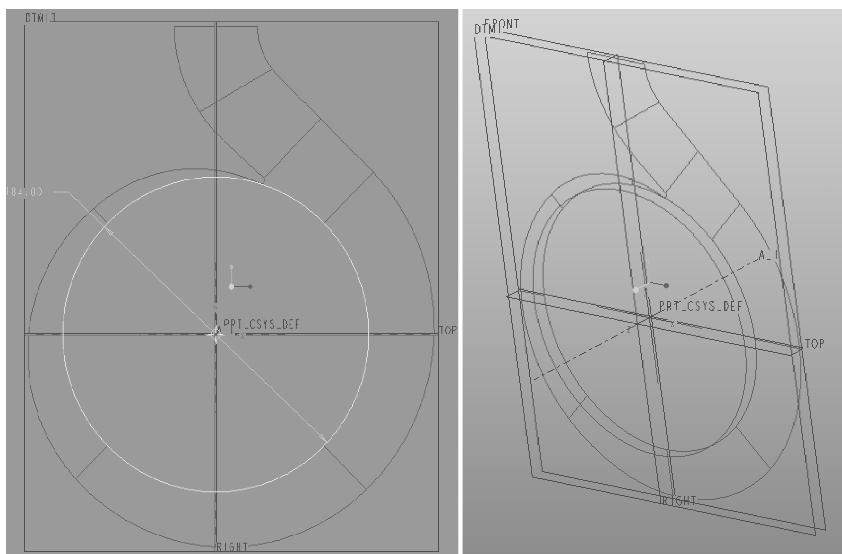


图 2-74　绘制基圆

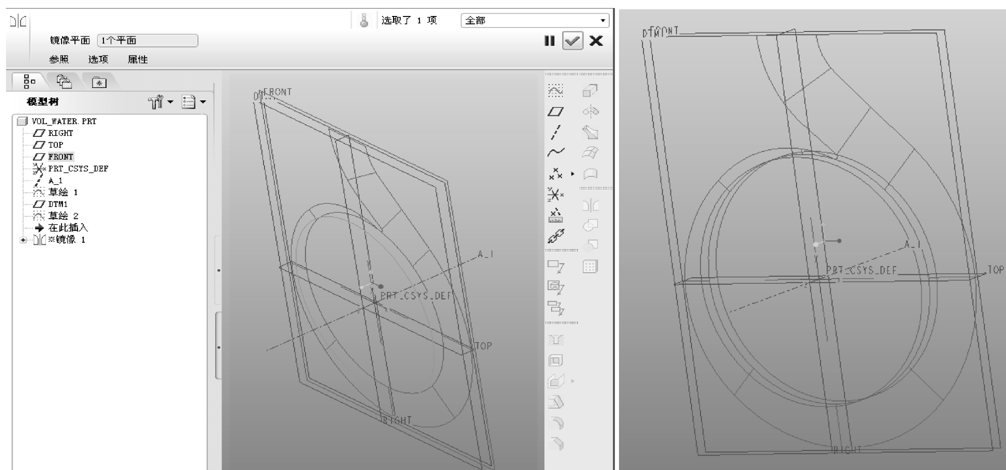


图 2-75　镜像基圆

（6）绘制各个断面形状

单击造型界面右侧的 【草绘】按钮，按照蜗壳水力图中各断面及出口进行草绘。进入草绘界面后，单击右侧工具栏的 【使用边】按钮，在草绘界面中选择基圆与断面线，如图 2-76 所示。

单击工具栏右侧的 【中心线】按钮，过基圆顶点与断面线顶点建立 3 条中心线，如图 2-77 所示。单击工具栏右侧的 【法向】按钮，调整中心线的倾斜角度，结果如图 2-78 所示。

单击工具栏右侧的 【线】按钮，绘制两条线段，如图 2-79 所示。

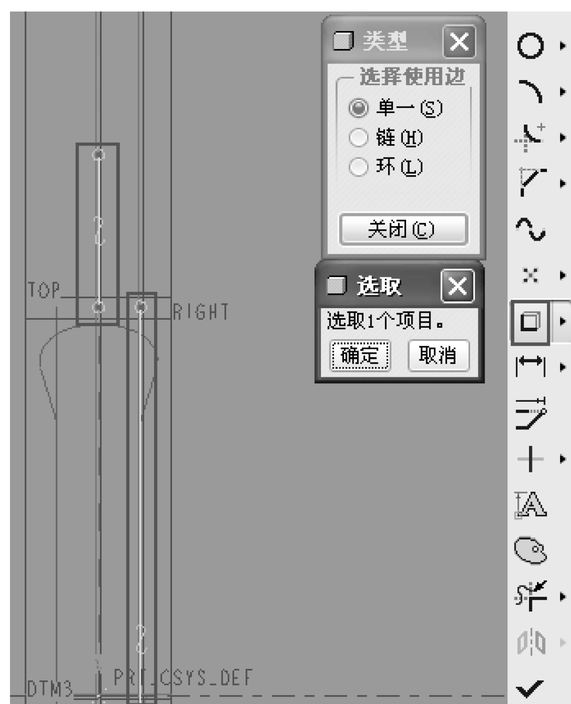


图 2-76　参照基圆与断面线

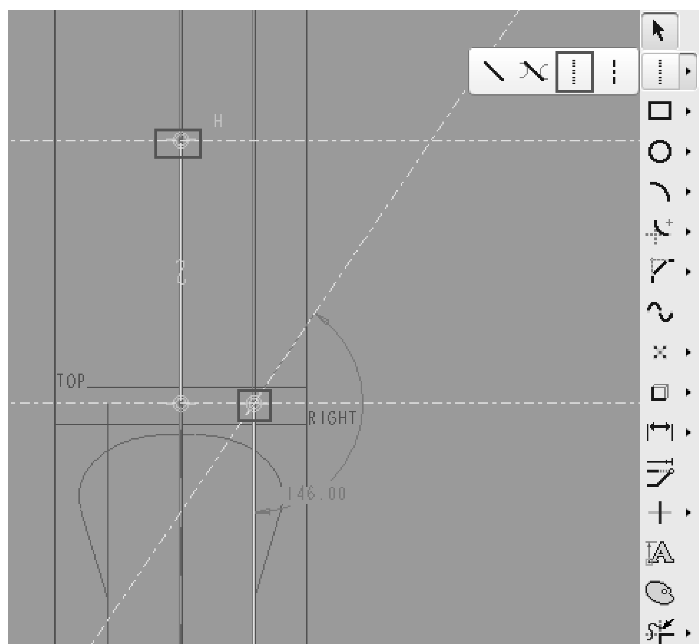


图 2-77　建立中心线

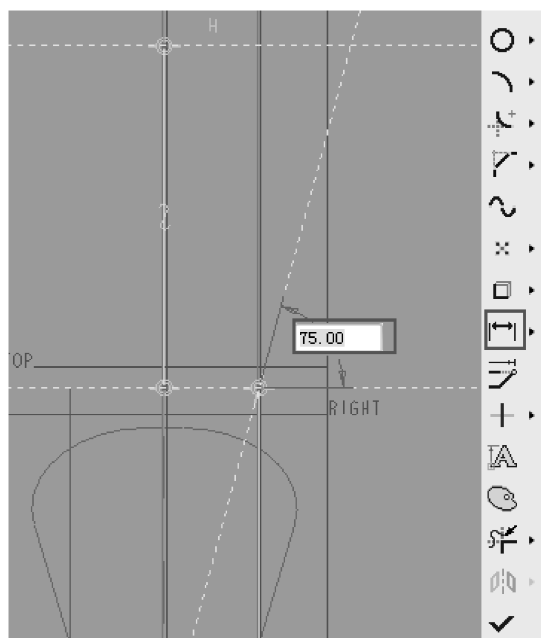


图 2-78　调整角度

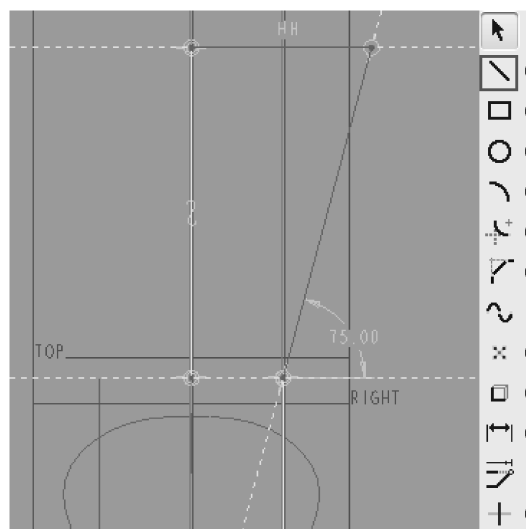


图 2-79　绘制线段

单击工具栏右侧的 【圆形】按钮，对两条线段倒圆角，如图 2-80 所示。

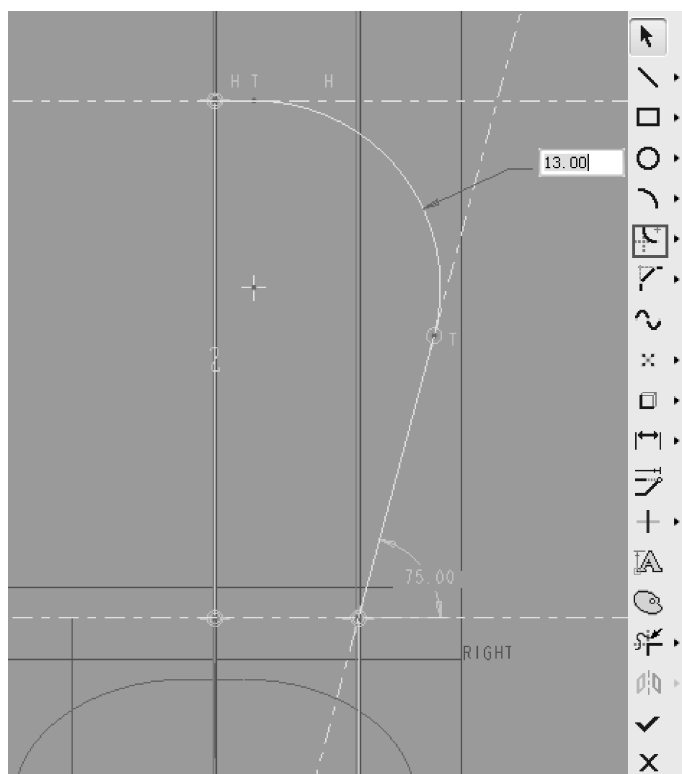


图 2-80　倒圆角

单击工具栏右侧的 【删除段】按钮，将参照的基圆与断面线两条线删除，如图 2-81 所示。

建立一条竖直的中心线，选取线段及圆弧，然后单击工具栏右侧的 【镜像】按钮，再单击刚建立的中心线，则绘制出完整的断面形状，如图 2-82 所示。

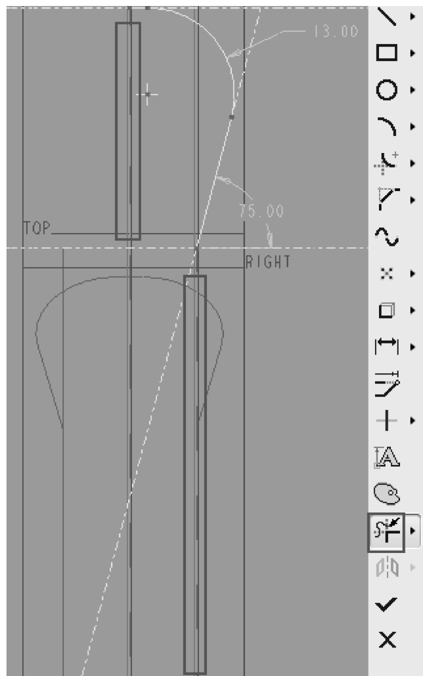


图 2-81　删除基圆与断面线

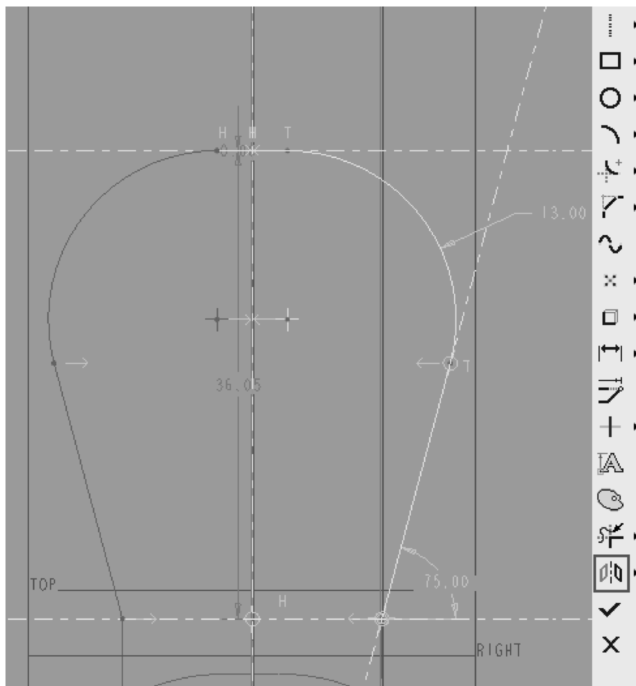


图 2-82　镜像

单击工具栏按钮，完成草绘。草绘时要注意的各断面图形一定要与螺旋线和基圆相交，如图 2-83 所示，图中红色圈中的三个点是需要注意的地方，一定要与原二维图数据完全一致。

其他截面的绘制方法与上述方法一致。为了隔舌处的造型方便，需要对第 9 断面进行一定的修改，使其下端要和基圆连接，如图 2-84 所示。

各个截面绘制完成后，最终的效果如图 2-85所示。

（7）蜗壳螺旋段曲面造型

单击造型界面右侧的 【草绘】按钮，弹出对话框，【草绘平面】的【平面】选择 FRONT 平面，单击【草绘】进入草绘界面。单击草绘界面右侧的 【使用边】按钮，弹出对话框后，选取第 1 ~9 断面线之间的螺旋线，如图 2-86 所示，单击草绘界面右侧的按钮，完成草绘。

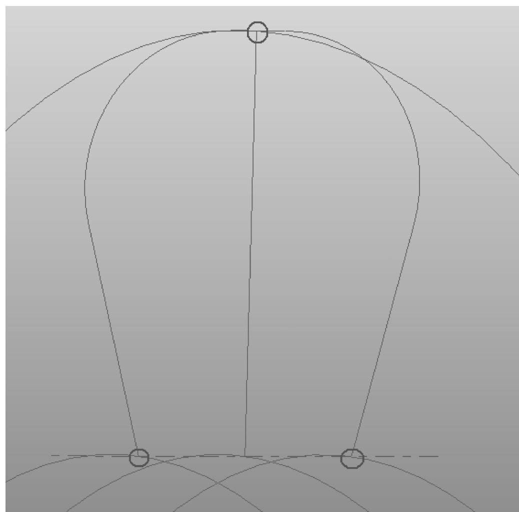


图 2-83　草绘断面形状

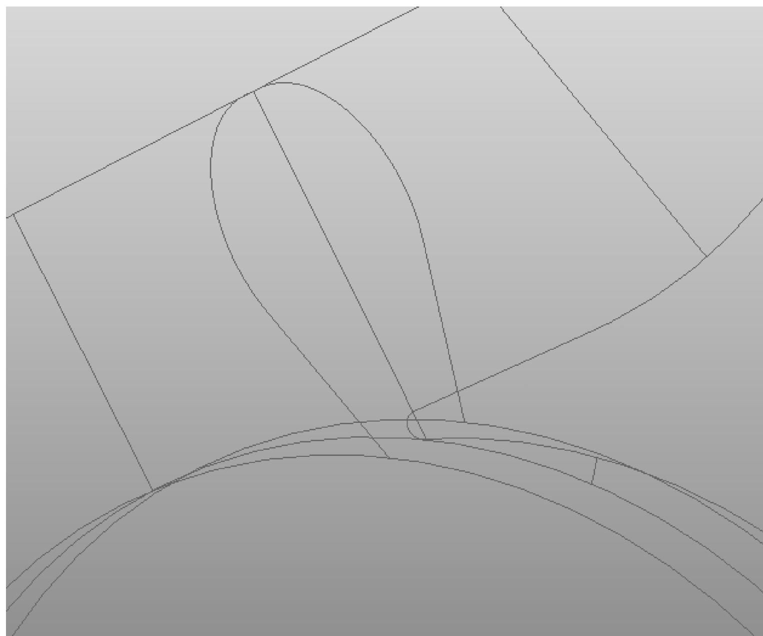


图 2-84　草绘第 9 断面

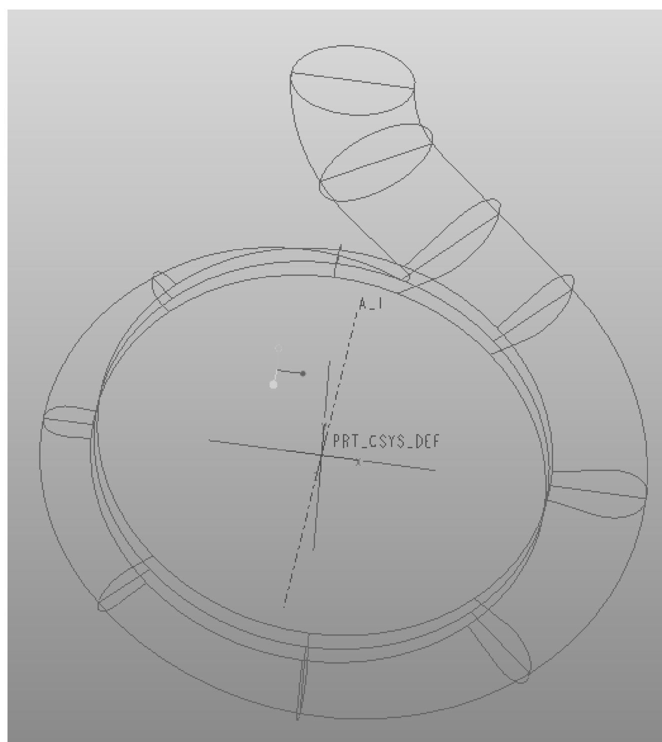


图 2-85　整体效果

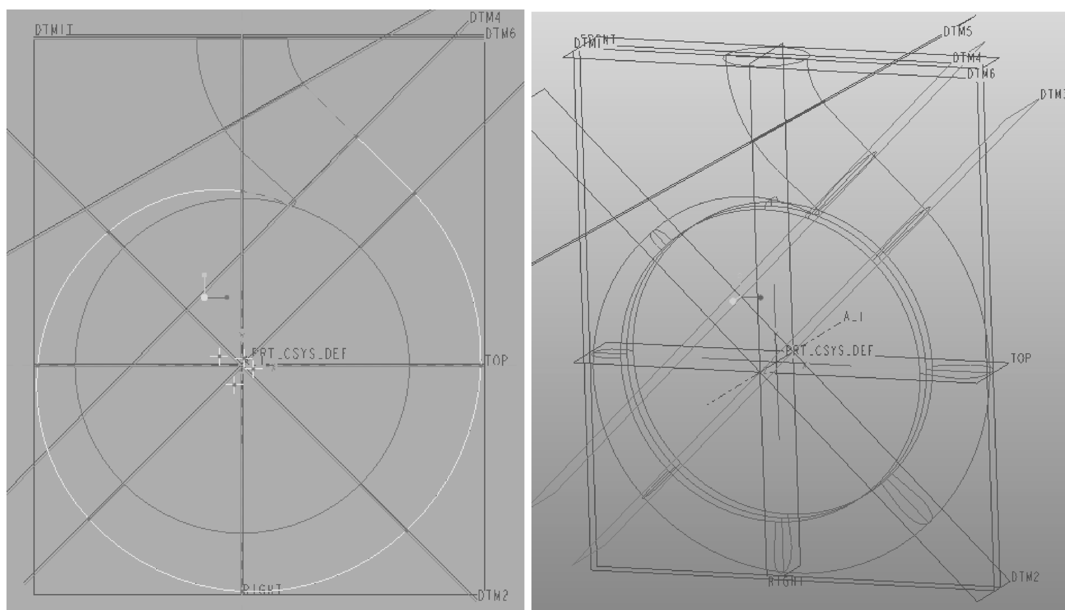


图 2-86　草绘螺旋段曲线

单击造型界面右侧的【边界混合】按钮，首先激活第一方向选项，依次选择各个断面线条，结果如图 2-87 所示。

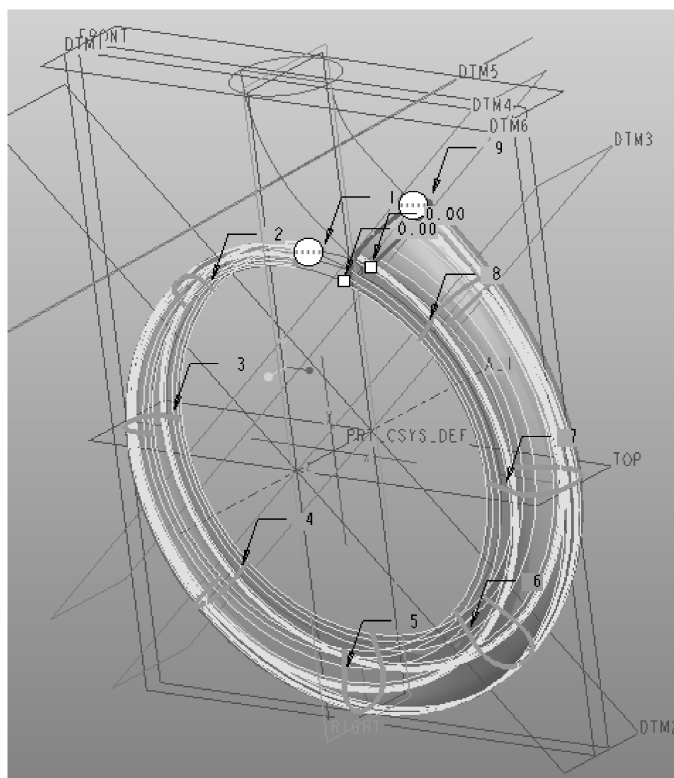


图 2-87　边界混合第 1～9 断面

单击造型界面上方的对话框，激活第二方向选项，如图 2-88 所示。



图 2-88　激活第二方向选项

依次选择之前建立的第一个基圆、螺旋线两个基圆线，如图 2-89 所示。

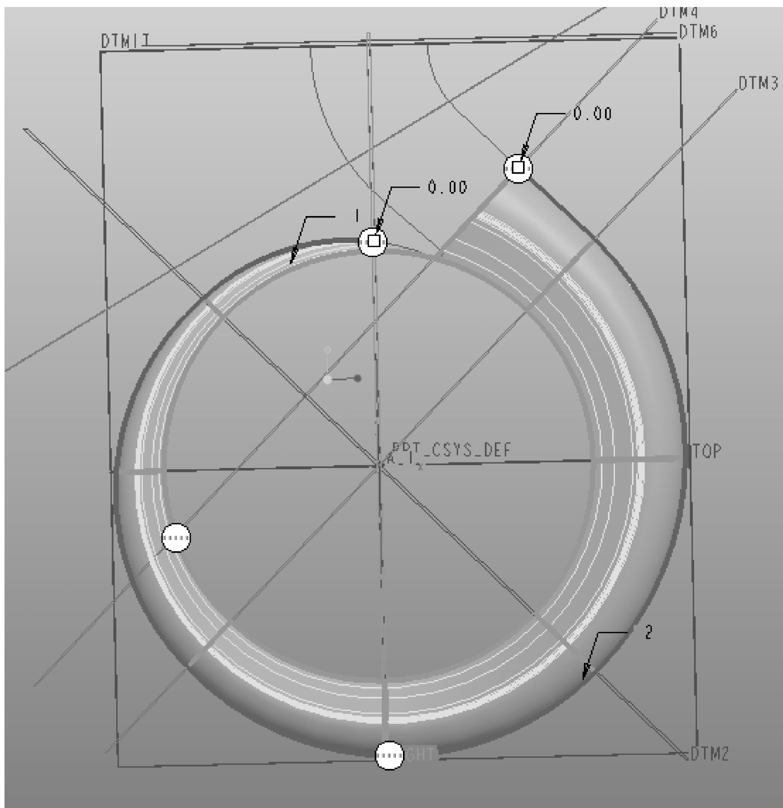


图 2-89　边界混合第二方向曲线

单击按钮，完成螺旋段曲面的造型。如图 2-90 所示。

（8）断面填充

单击菜单【编辑】→【填充】，如图 2-91 所示。

点开对话框中的【参照】，单击【定义】，然后选取第 1 断面所在平面，单击【草绘】对话框中的【草绘】进入草绘界面。

单击草绘界面右侧的【使用边】，弹出对话框后，在【类型】的对话框中选择【环】，然后鼠标左键单击一下第 1 断面的形状，就可以快速绘制出其轮廓，再用直线连接断面底端，使图形封闭，如图 2-92 所示。然后单击草绘界面右侧的按钮，完成草绘。

单击按钮完成操作。重复此步骤，填充第 9 断面。填充结果如图 2-93 所示。

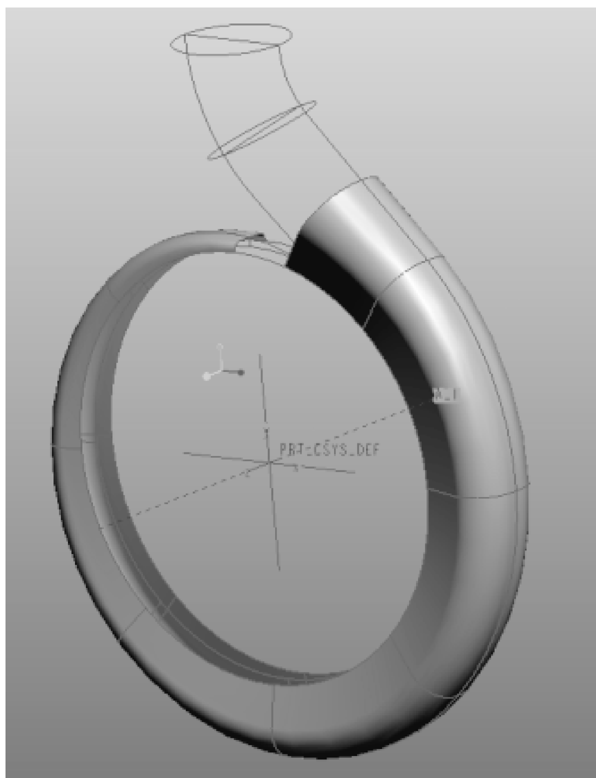


图 2-90　螺旋段曲面



图 2-91　启动填充命令

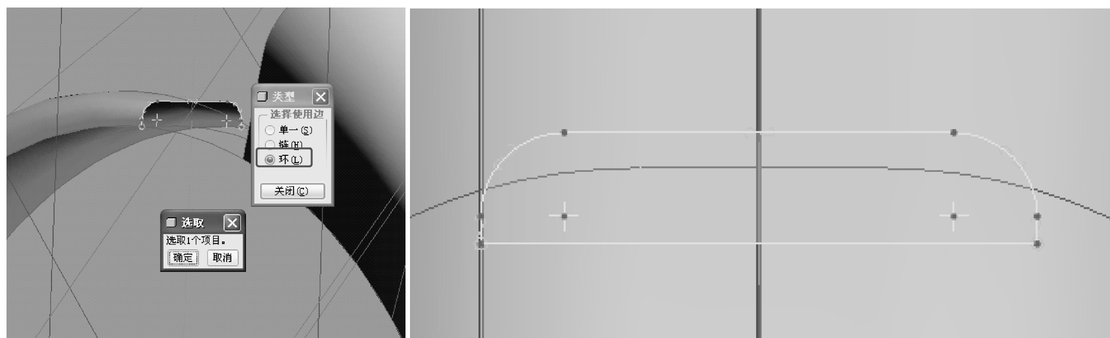


图 2-92　草绘第 1 断面形状

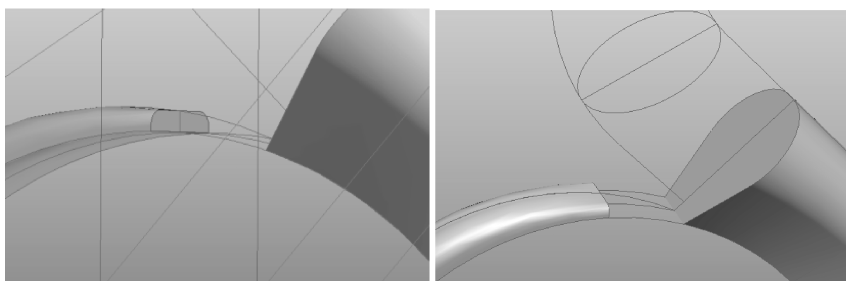


图 2-93　填充后的第 1 与第 9 断面

（9）拉伸基圆面

单击造型界面右侧的【拉伸】按钮，在【拉伸】对话框中选中【曲面】，单击【放置】，在展开的对话框中单击【定义】按钮。弹出【草绘】对话框后，在造型区域内单击 FRONT 基准面，然后单击对话框中的【草绘】，进入草绘界面。绘制第 1 ~ 9 断面线间的基圆，如图 2-94 所示。然后单击草绘界面右侧的✔按钮，完成草绘。

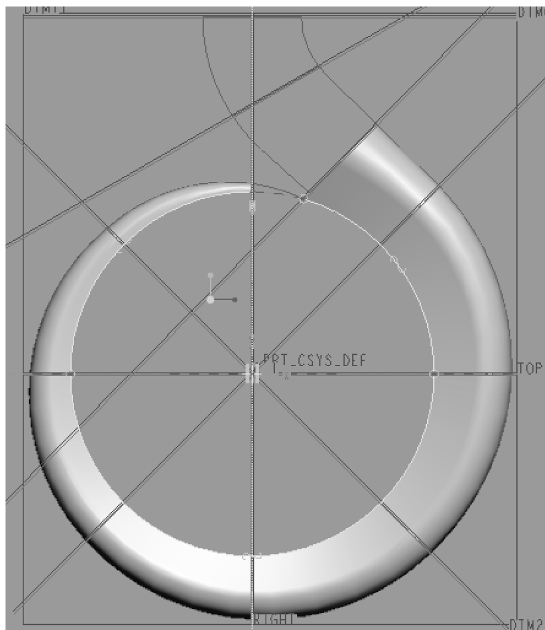


图 2-94　草绘

【拉伸】对话框拉伸方式选择对称，拉伸长度设置为 20（蜗壳进口宽度），单击按钮，完成操作。最终效果如图 2-95 所示。

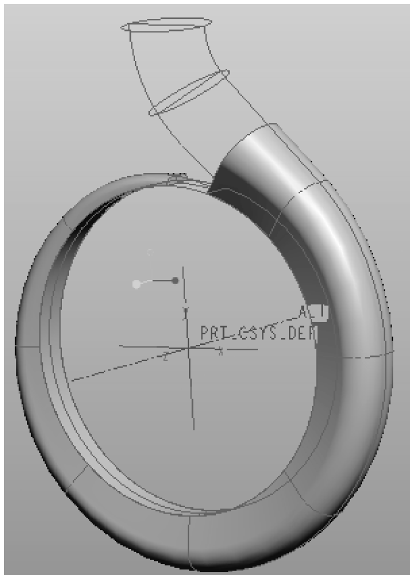


图 2-95　拉伸基圆面

（10）曲面合并

选中蜗壳螺旋面、第 1 断面、第 9 断面、基圆面，单击菜单【编辑】→【合并】，如图 2-96 所示，单击【确定】完成操作。

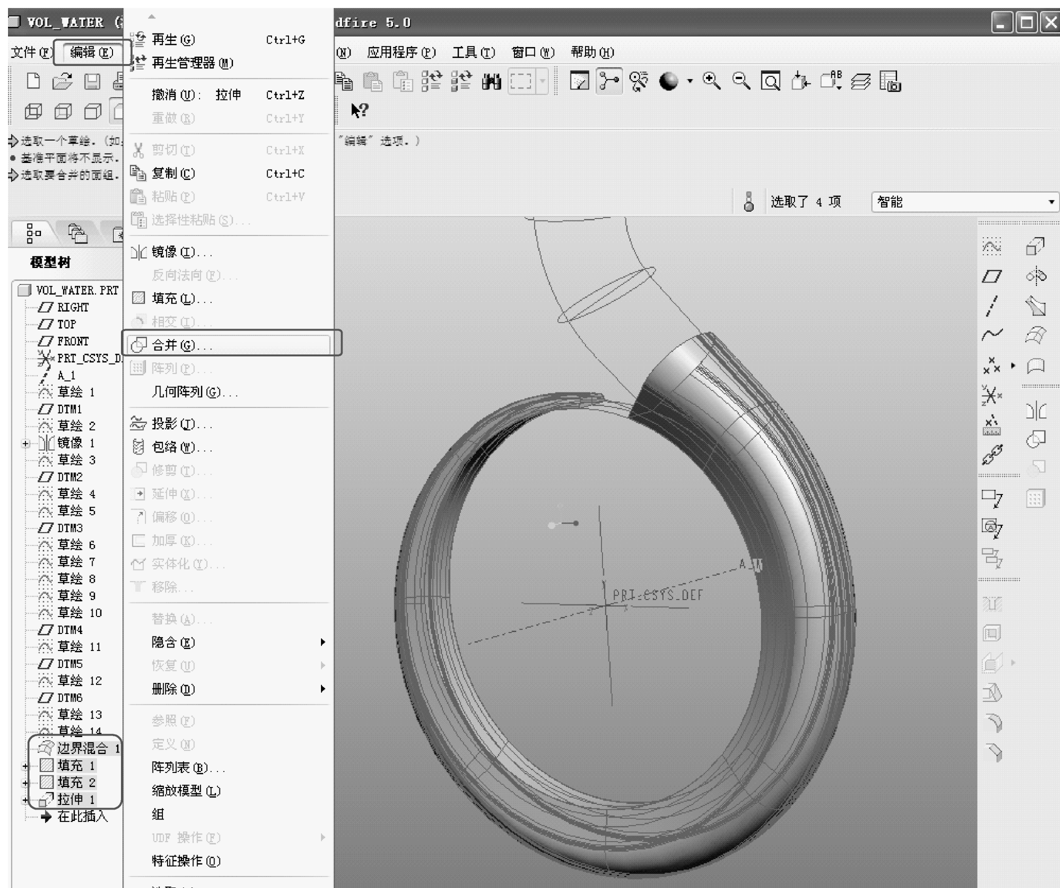


图 2-96　曲面合并

（11）螺旋段实体化

选中合并的螺旋段，单击菜单【编辑】→【实体化】，如图 2-97 所示，单击按钮完成操作。

（12）隔舌造型

单击造型界面右侧的【拉伸】按钮，在【拉伸】对话框中选中【去除材料】，单击【放置】，在展开的对话框中单击【定义】按钮。弹出【草绘】对话框后，在造型区域内单击 FRONT 基准面，然后单击对话框中的【草绘】，进入草绘界面。绘制隔舌形状，具体操作参考步骤（6），结果如图 2-98 所示。然后单击草绘界面右侧的按钮，完成草绘。

【拉伸】对话框拉伸方式选择对称，拉伸长度设置为 20（蜗壳进口宽度），单击按钮，完成操作，如图 2-99 所示。

单击造型界面右侧的【倒圆角】按钮，选择隔舌边，根据实际情况对其倒圆角。本例中隔舌与基圆间隔很小，故采用变半径倒圆角，如图 2-100 所示。

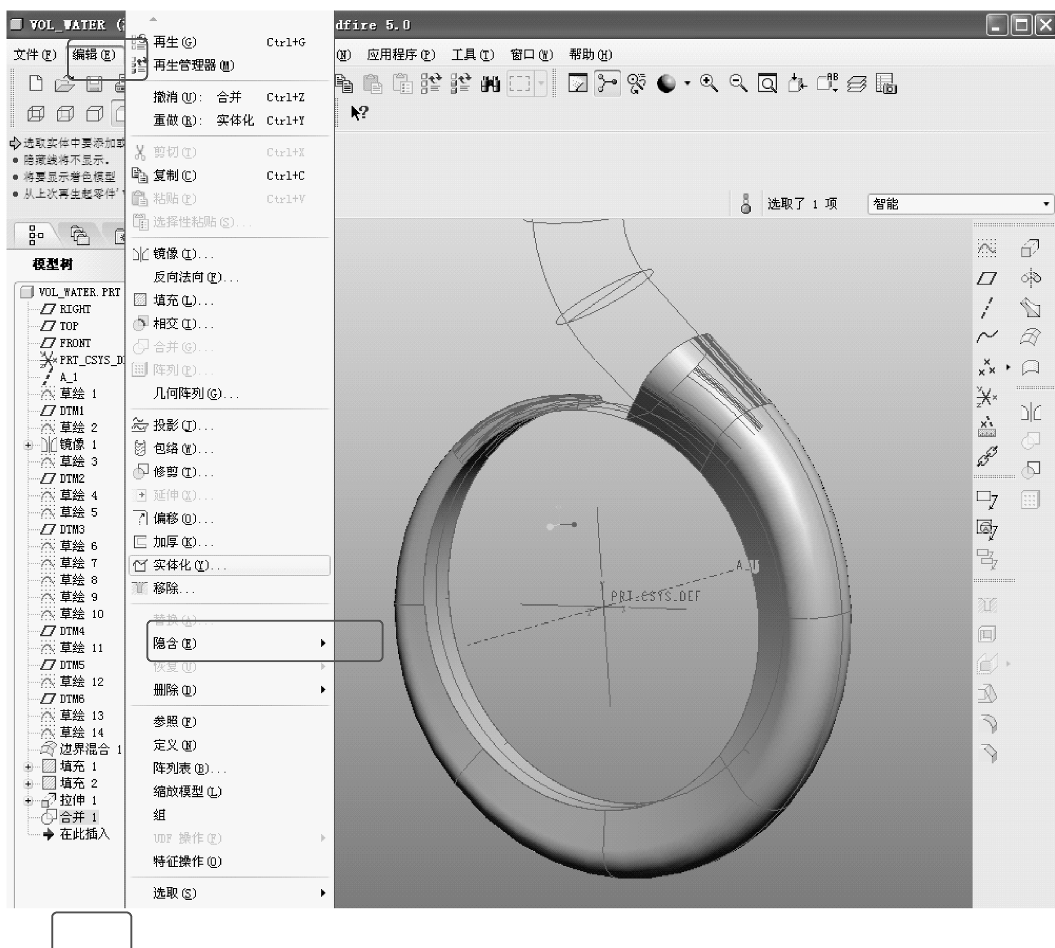


图 2-97　实体化

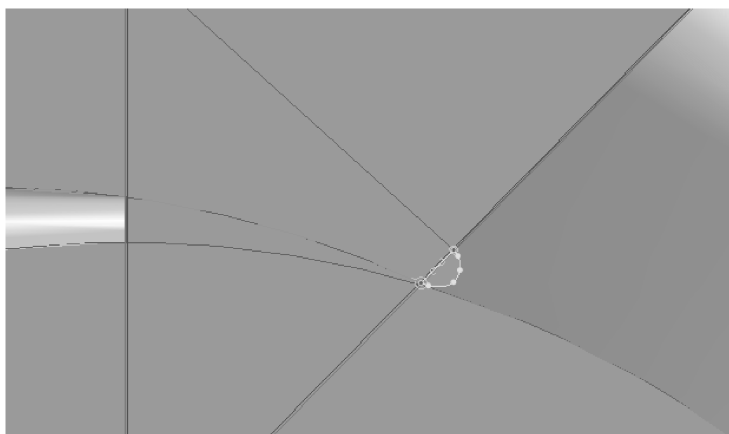


图 2-98　草绘隔舌

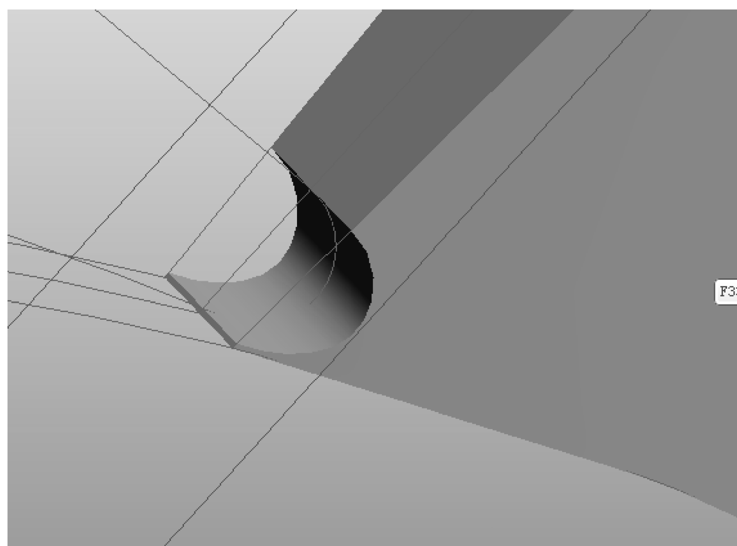


图 2-99　拉伸隔舌

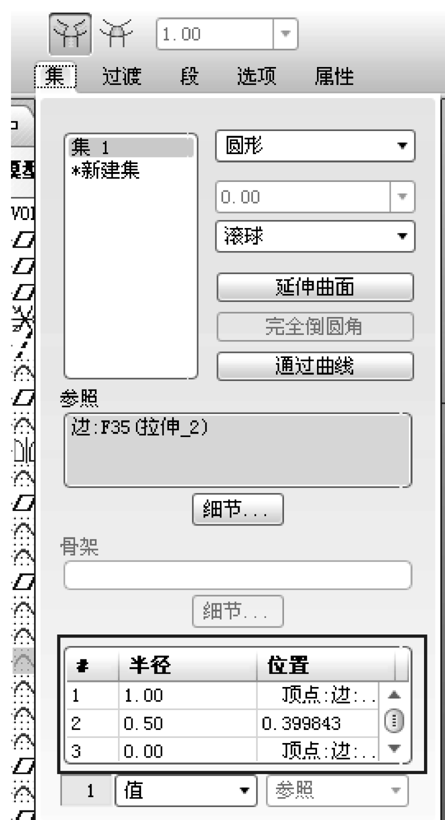


图 2-100　变半径倒圆角

单击✔按钮完成操作，最后效果如图 2-101 所示。

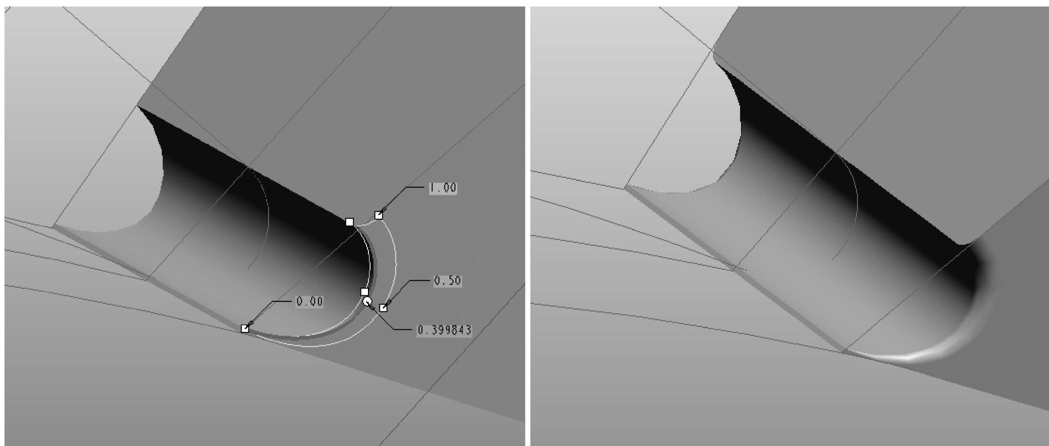


图 2-101　倒圆角

（13）隔舌与第 1 断面间的螺旋段造型

对第 1 断面与隔舌处断面进行草绘，断面形状要封闭。草绘出两端面之间的基圆及螺旋线，具体操作参考步骤（6），如图 2-102 所示。

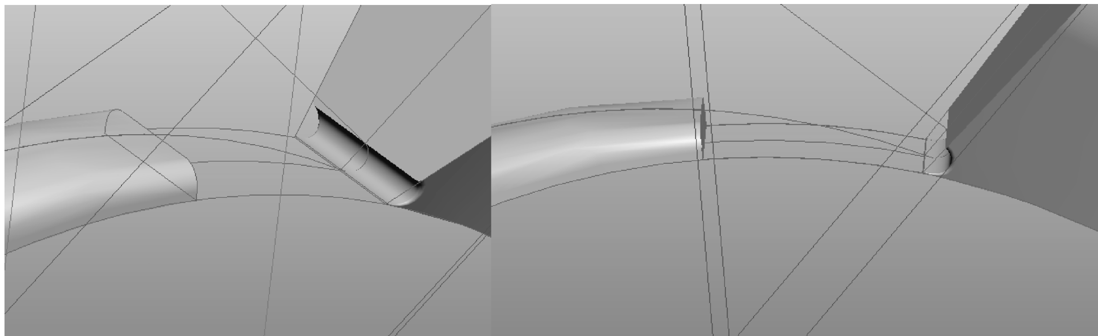


图 2-102　草绘

按照步骤（8），对第 1 断面与隔舌处断面进行填充。

单击造型界面右侧的【边界混合】按钮，依次选择第 1 断面形状与隔舌断面，如图所示。每个断面上都会有个小白点，鼠标左键单击可以移动，每个断面小白点的位置必须要对应。然后，单击造型界面上方的对话框，激活第二方向选项。依次选中之前建立第一个基圆、螺旋线、第二个基圆，如图 2-103 所示。单击✔按钮，完成螺旋段曲面的造型。

选中刚建立的 3 个面（第 1 断面与隔舌处断面进行填充得到的曲面，以及螺旋段曲面），单击菜单【编辑】→【合并】，如图 2-104 所示，单击✔按钮完成操作。

选中合并的曲面，单击菜单【编辑】→【实体化】，如图 2-105 所示，单击✔按钮完成操作。

隔舌与第 1 断面间的螺旋段造型完成，最终效果如图 2-106 所示。

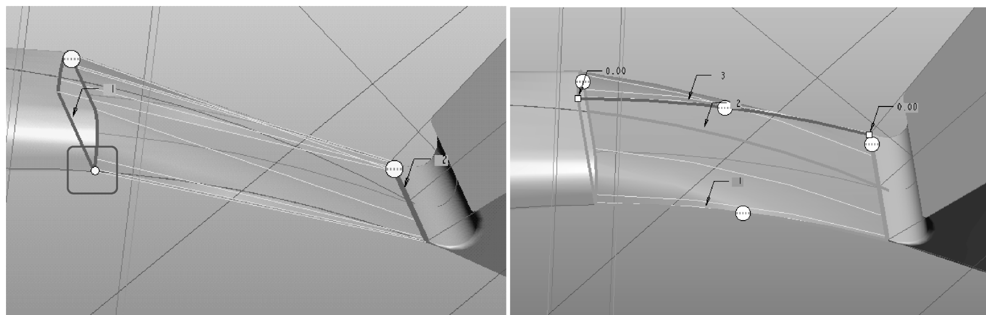


图 2-103　边界混合

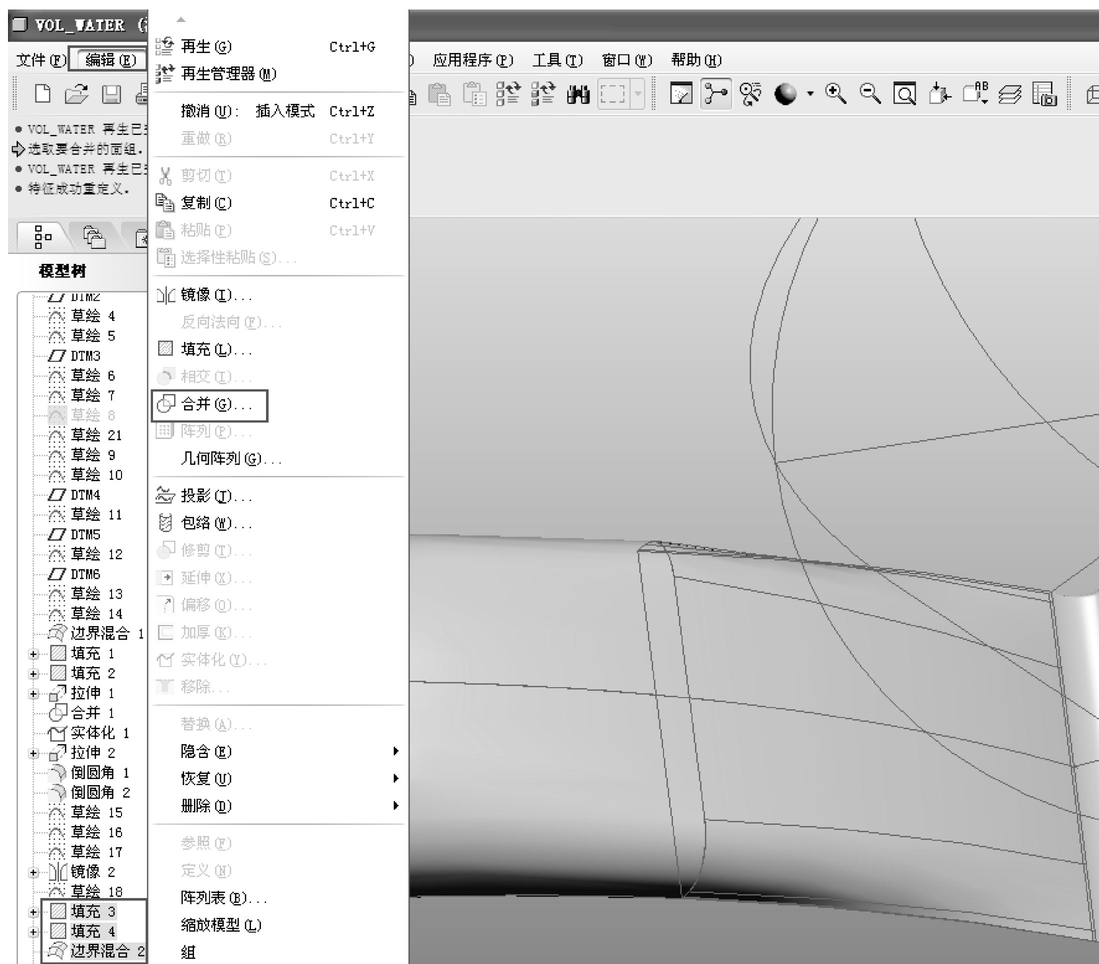


图 2-104　曲面合并

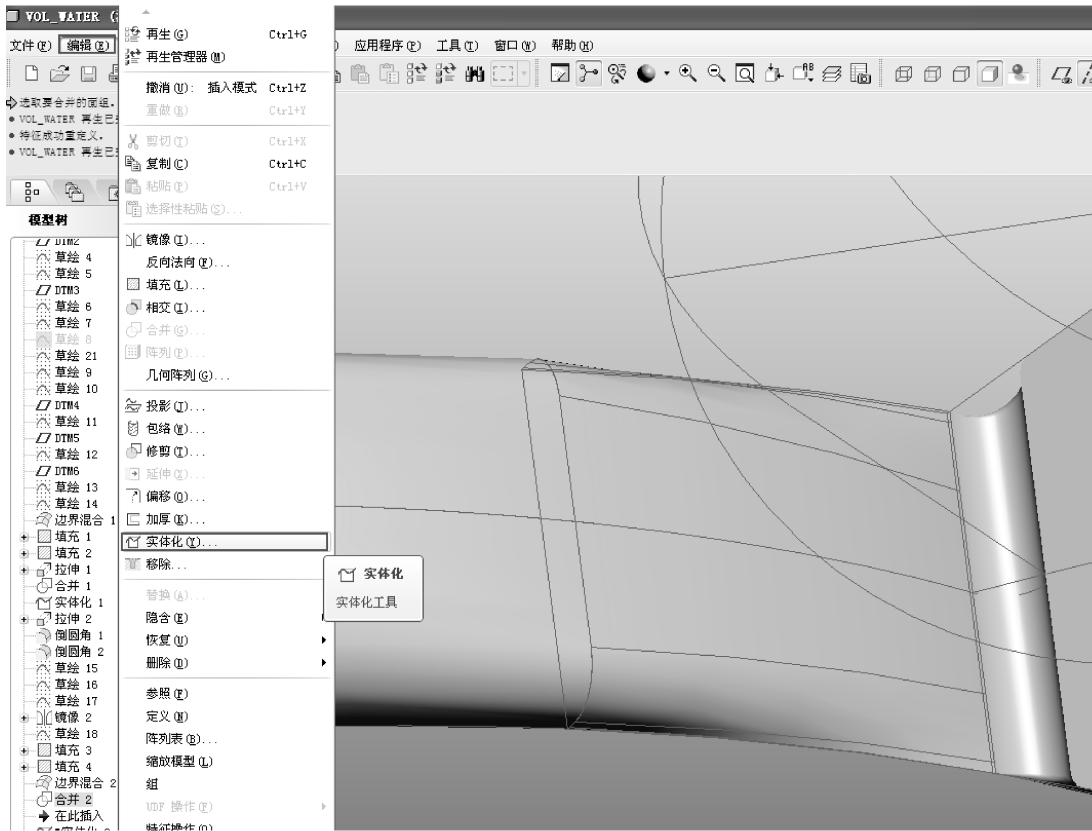


图 2-105　实体化

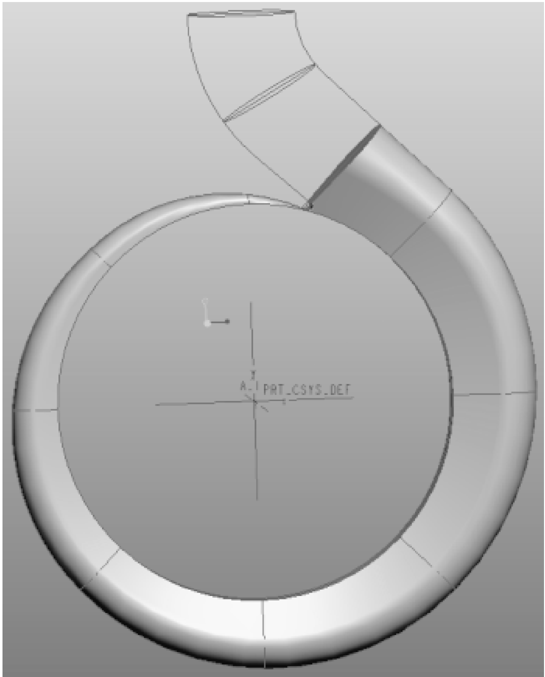


图 2-106　蜗壳螺旋段

(14) 扩散段造型

仿照步骤（14），首先草绘第 9 断面及扩散段间的曲线，如图 2-107 所示。

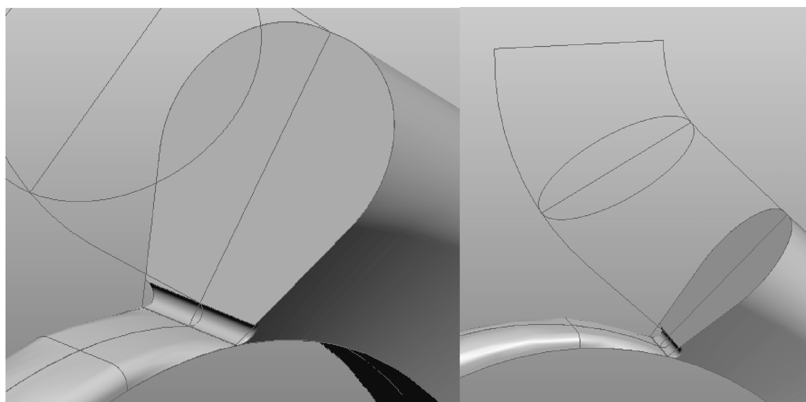


图 2-107　草绘

填充蜗壳出口与第 9 断面，如图 2-108 所示。

边界混合扩散段曲面，如图 2-109 所示。

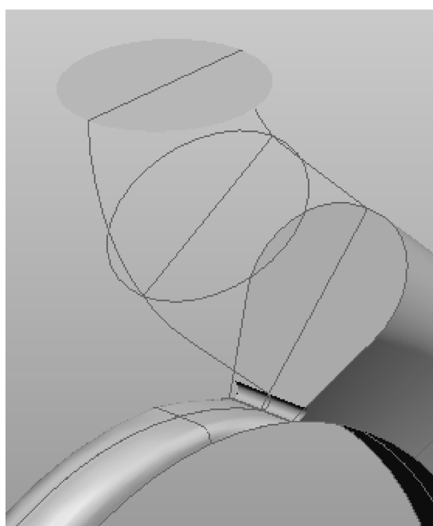


图 2-108　填充

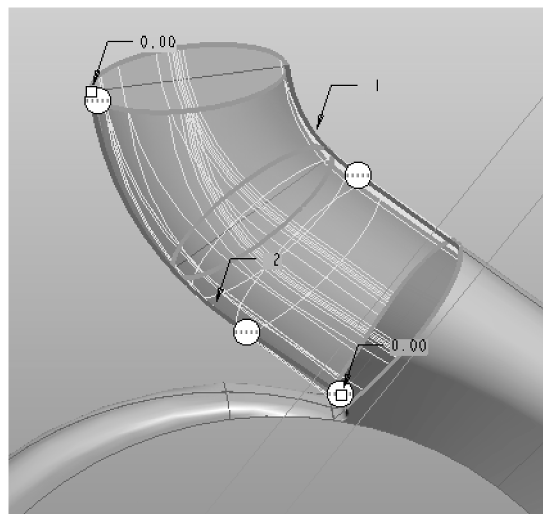


图 2-109　边界混合

将扩散段曲面、第 9 断面及蜗壳出口三个面合并，如图 2-110 所示。并将合并的曲面实体化，如图 2-111 所示。

(15) 叶轮与蜗壳间隙造型

如图 2-112 所示，叶轮的外径要小于蜗壳的基圆，存在间隙，为了在叶轮水体和蜗壳水体之间设置交界面，需要将这两个水体之间的间隙填满，一般取间隙断面的形状为梯形，可以将这部分水体绘制在蜗壳水体上，也可以绘制在叶轮水体上，还可以各取一半。本例由于隔舌部分较薄，为了划分网格方便本书将间隙绘制在蜗壳水体上。

通过旋转命令来造型如图 2-113 所示。

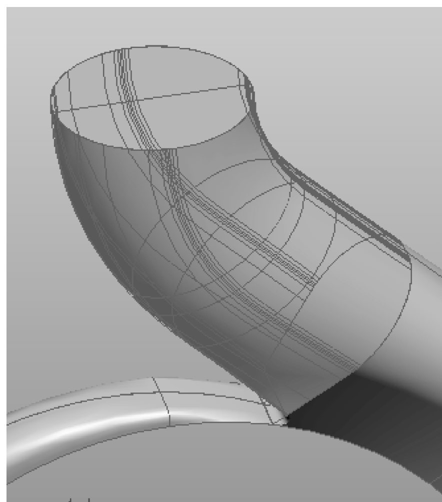


图 2-110　合并

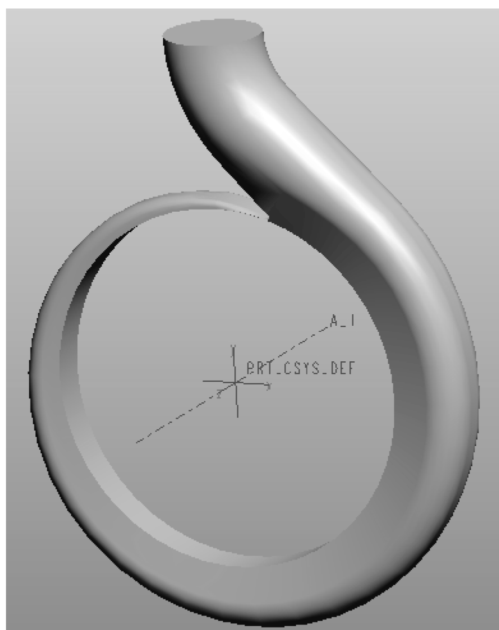


图 2-111　实体化

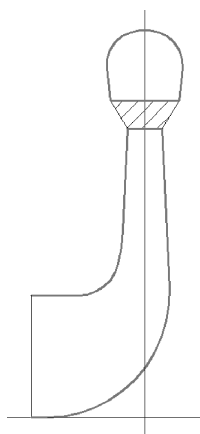


图 2-112　间隙

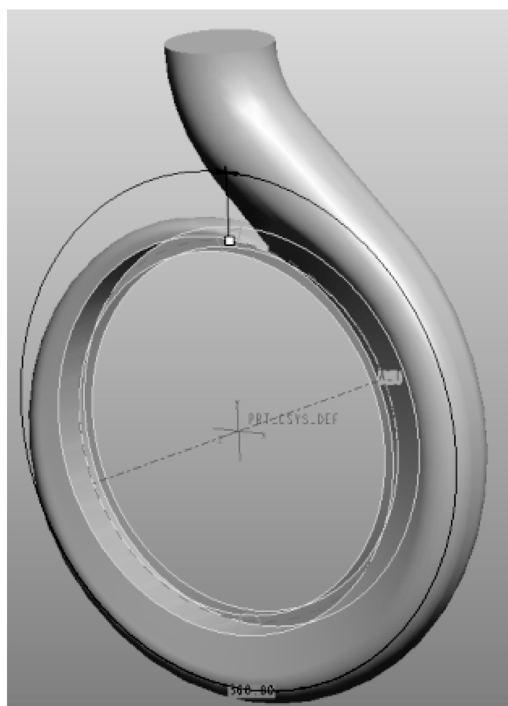


图 2-113　旋转间隙

（16）保存文件

至此，蜗壳水体的造型全部完成，单击【保存】按钮，保存文件。最终效果如图 2-114 所示。

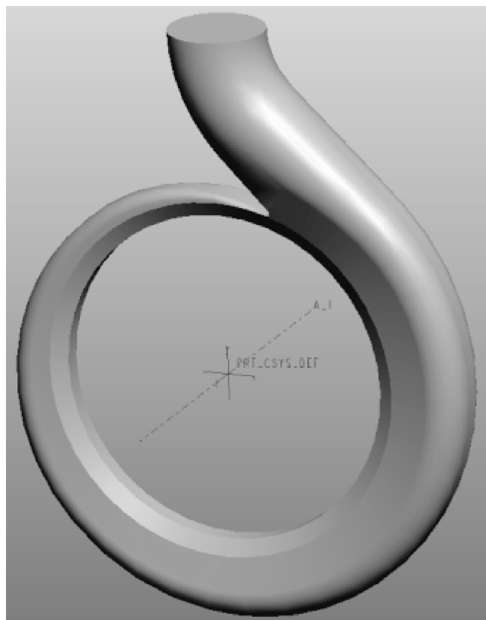


图 2-114　蜗壳造型

2.2.3　进出口延长段造型

为了提高水泵数值模拟的精度，通常在泵的进口和出口添加延长段，延长段长度一般为管径的 4 倍。

进出口延长段均为圆柱体，造型通过拉伸或旋转生成。本例进口延长段采用拉伸造型，出口延长段采用旋转造型。叶轮进口直径为 71mm，蜗壳出口直径为 50mm。

（1）进口延长段造型

按照之前方法，建立进口延长段水体文件，文件名设为 in_water，选用 mmns_part_solid 模板。

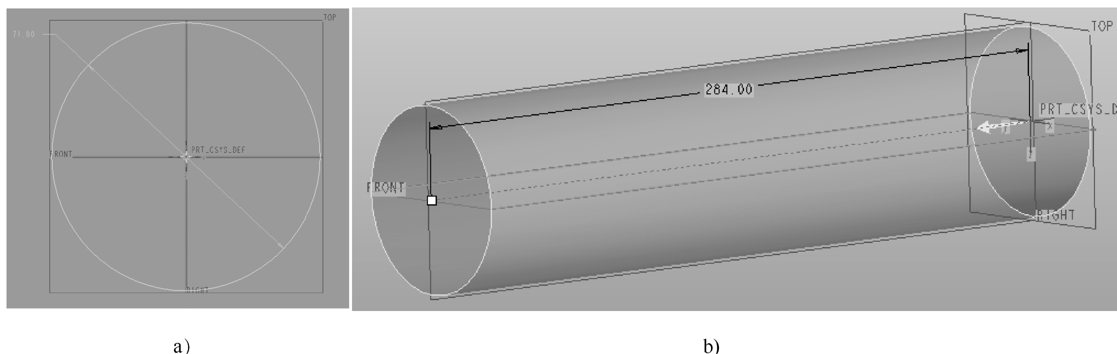
单击造型界面右侧的【拉伸】命令，弹出对话框后选择【实体】，选择 TOP 平面作为草绘平面，进入草绘界面后，绘制一个直径 71mm 的圆（圆心在坐标原点），如图 2-115a 所示。然后单击草绘界面右侧的✔按钮，完成叶片工作面的草绘。设置拉伸长度为 284，单击✔按钮，完成此操作。最终结果如图 2-115b 所示。单击【保存】按钮，保存文件。

（2）出口延长段造型

建立出口延长段水体文件，文件名设为 out_water，选用 mmns_part_solid 模板。

单击造型界面右侧的【旋转】按钮，弹出对话框后选择【实体】，选择 TOP 平面作为草绘平面，进入草绘界面后，绘制一个长 200mm 宽 25mm 的矩形（矩形的一个点必须

在坐标原点)，如图 2-116 所示。然后单击草绘界面右侧的✔按钮，完成叶片工作面的草绘。选择 x 轴作为旋转轴，单击✔按钮，完成此操作。单击💾【保存】按钮，保存文件。



a)　　　　b)

图 2-115　拉伸进口延长段

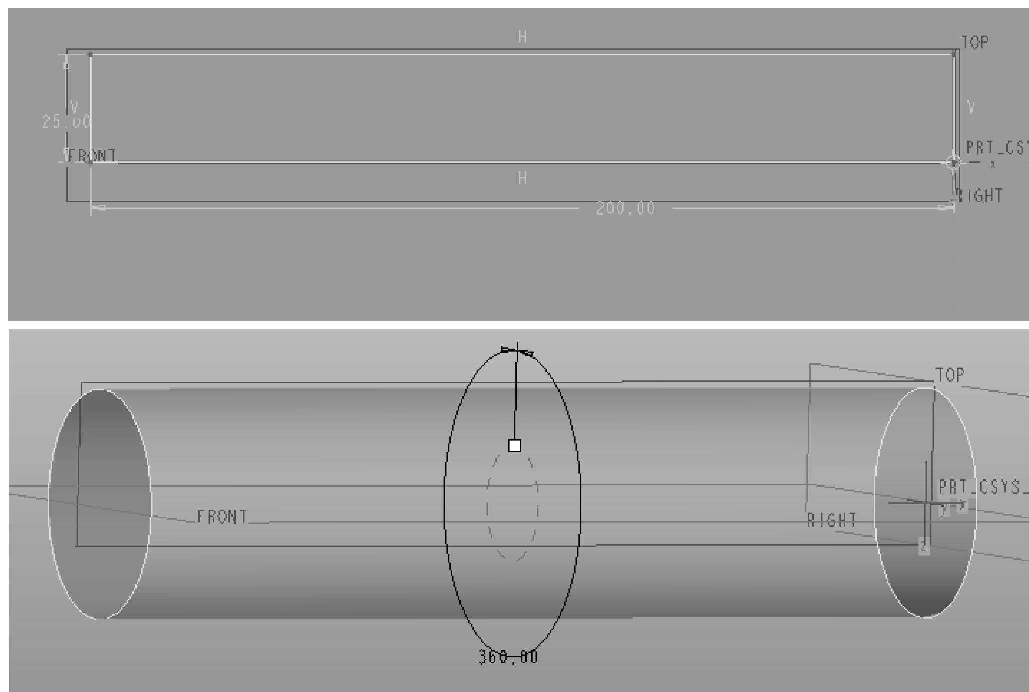


图 2-116　旋转出口延长段

2.2.4　模型装配

（1）建立泵装配 asm 文件

启动 Pro/E，进入界面后，单击🗋【新建】按钮，出现如图 2-117 所示对话框。在【类型】栏选择【组件】，【子类型】栏选择【设计】，在【名称】栏输入 pump，取消【使用缺省模板】前的对勾，单击【确定】按钮，【模板】栏选择 mmns_asm_design 模板，单击【确定】，进入装配界面。

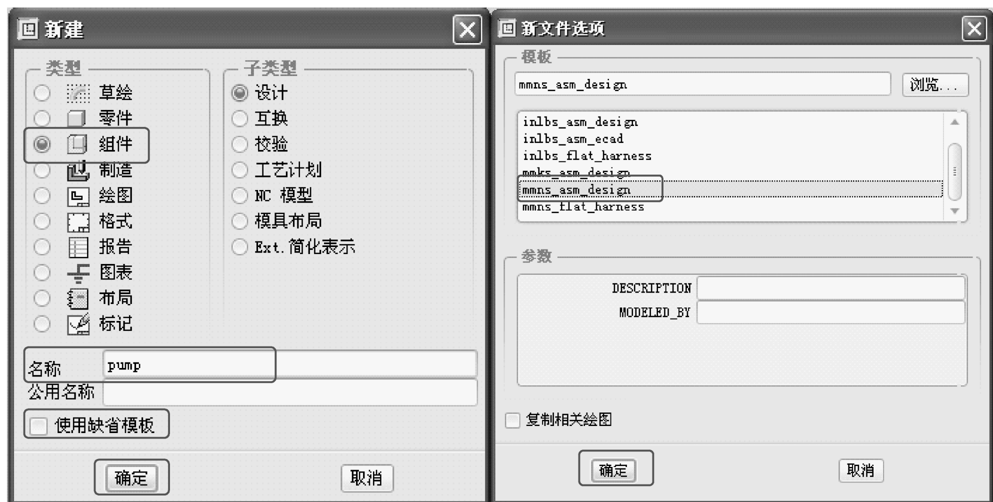


图 2-117　建立离心泵装配文件

（2）装配叶轮水体

单击装配界面右侧的【装配】按钮，弹出【打开】对话框，选中叶轮水体文件，单击【打开】按钮，如图 2-118 所示。

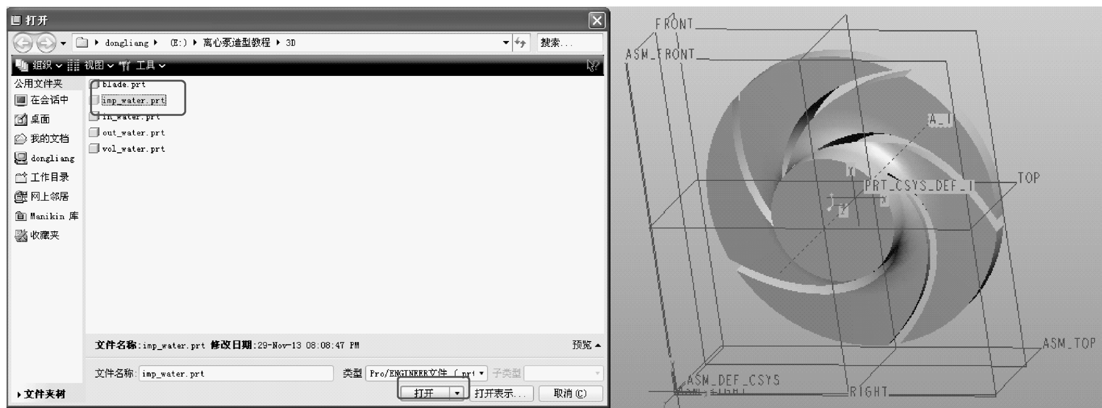


图 2-118　导入叶轮

点开装配界面上方的【放置】选项卡，在装配区域单击鼠标左键，选取装配图坐标系与叶轮水体零件图坐标系，建立坐标系约束，如图 2-119 所示。单击按钮，完成操作。

（3）装配蜗壳水体

单击装配界面右侧的【装配】按钮，弹出【打开】对话框，选中蜗壳水体文件，单击【打开】按钮，如图 2-120 所示。

点开装配界面上方的【放置】选项卡，在装配区域单击鼠标左键，选取叶轮的基准轴与蜗壳的基准轴，建立约束，如图 2-121 所示。

单击【放置】选项卡的【新建约束】，在装配区域单击鼠标左键，选取叶轮中间平面与蜗壳中间平面，建立约束，如图 2-122 所示。单击✔按钮，完成操作。注意叶轮的旋转方向，可以通过单击选项卡中的【反向】按钮来更改。

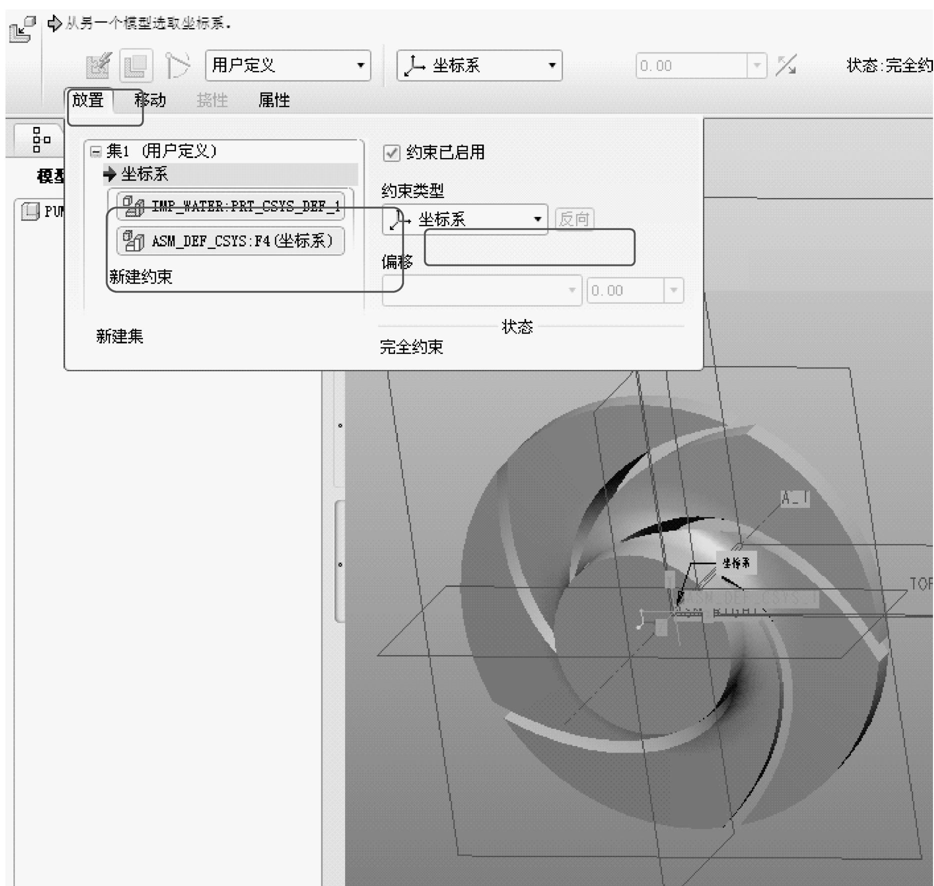


图 2-119　调整叶轮位置

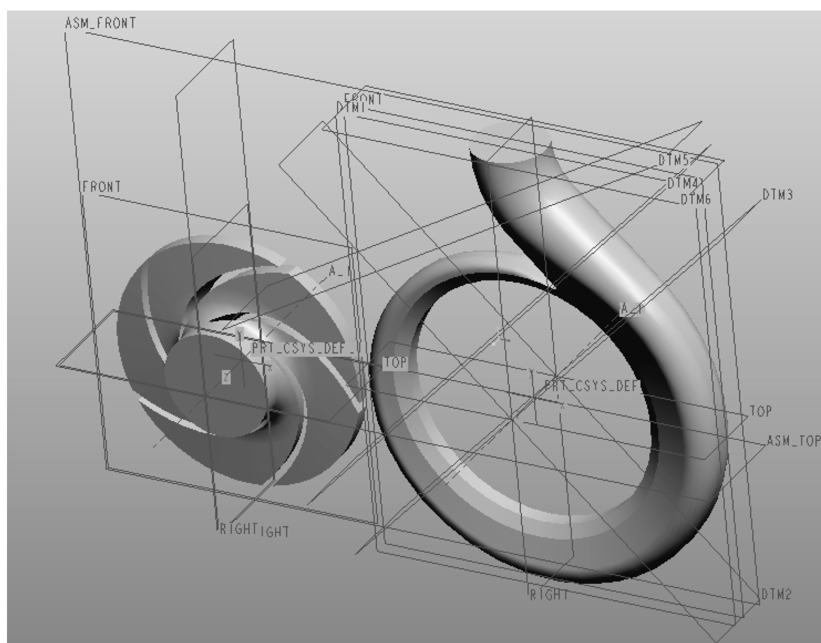


图 2-120　导入蜗壳



图 2-121　调整蜗壳位置



图 2-122　调整蜗壳位置

（4）装配进口延长段水体

单击装配界面右侧的 【装配】按钮，弹出【打开】对话框，选中进口延长段文件，单击【打开】按钮，如图 2-123 所示。

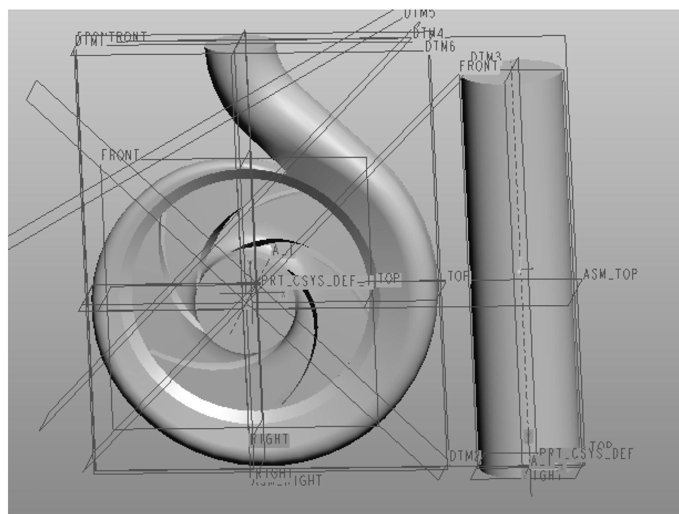


图 2-123　导入进口延长段

点开装配界面上方的【放置】选项卡，在装配区域单击鼠标左键，选取叶轮的基准轴与进水延长段水体的基准轴，建立约束，如图 2-124 所示。



图 2-124　调整进口延长段位置

单击【放置】选项卡的【新建约束】，在装配区域单击鼠标左键，选取叶轮进口面与进水延长段水体的端面，建立约束，如图 2-125 所示。单击✔按钮，完成操作。



图 2-125　调整进口延长段水体位置

(5) 装配出口延长段水体

单击装配界面右侧的 【装配】按钮，弹出【打开】对话框，选中出口延长段水体文件，单击【打开】按钮，如图 2-126 所示。

点开装配界面上方的【放置】选项卡，在装配区域单击鼠标左键，选取蜗壳出口面与出口延长段水体的端面，建立约束，如图 2-127 所示。

单击【放置】选项卡的【新建约束】，在装配区域单击鼠标左键，选取蜗壳中间平面与出口延长段水体一个基准面，建立约束，再单击【放置】选项卡的【新建约束】，在装配区域单击鼠标左键，选取蜗壳轴向平面与出口延长段另一个基准面，建立约束。如图 2-128 所示，单击✔按钮，完成操作。

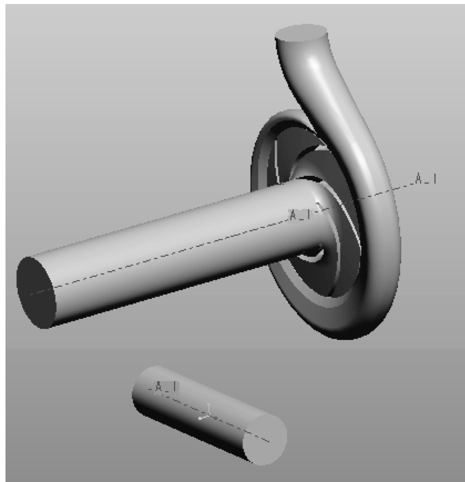


图 2-126　导入出口延长段水体

在各个零件装配过程中，一定要确定零件位置被完全约束。



图 2-127　调整出口延长段水体位置



图 2-128　装配出口延长段水体

（6）保存文件

至此，离心泵装配全部完成，单击【保存】按钮，保存文件。最终效果如图 2-129 所示。

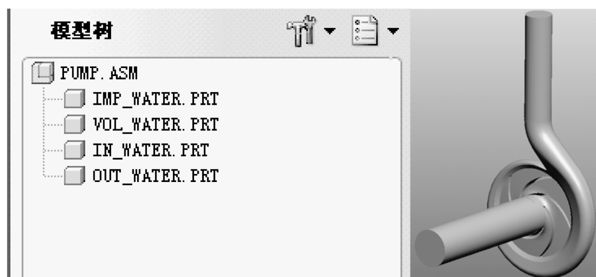


图 2-129　离心泵装配图

（7）导出 stp 文件

单击菜单栏【文件】→【保存副本】，在【保存副本】对话框中选择 STEP（＊.stp）类型，单击【确定】，如图 2-130 所示。



图 2-130　导出 stp 文件

弹出【导出 STEP】对话框，【几何】一栏仅勾选【实体】，【坐标系】为【缺省】，如图 2-131 所示，单击【确定】按钮。导出的 pump_asm. stp 为下一步划分网格所需的文件。



图 2-131　导出 stp 文件对话框

2.3　轴流泵叶轮造型

（1）新建叶片 prt 文件

启动 Pro/E，选择【文件】→【设置工作目录】，创建三维模型存储目录。选择【文件】→【新建】，或者直接单击标题栏的【新建】按钮，弹出的新建窗口如图 2-132 所示，在【类型】栏选择【零件】，【子类型】栏选择实体，在【名称】处输入需要保存叶片的文件名称，如 Axial_imp，去掉勾选的【使用缺省模板】，然后单击【确定】按钮。在新文件选项窗口中选择需要的模板单位，如图 2-133 所示，一般选择 mmns_part_solid，然后单击【确定】按钮。

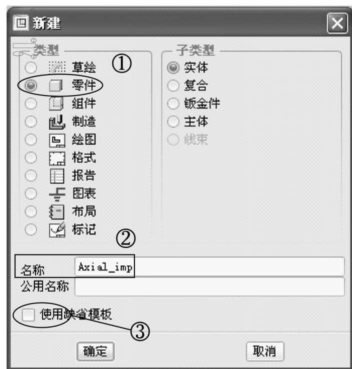


图 2-132　新建零件

（2）创建旋转轴

选取特征工具栏的【轴】，弹出【基准轴】对话框，在工作区域选取两平面 RIGHT 平面、TOP 平面，如图 2-134 所示，单击【确定】按钮完成。



图 2-133 设置基本单位



图 2-134 新建轴

（3）木模型图分析

根据图 2-135 确定工作面和背面各点相对应的 R、Z 值，同时由图中的翼形展开图计算出与 R、Z 值相对应的 θ 值，工作面点 θ 值计算公式为：$\theta=\dfrac{360L}{2\pi R}$；

背面点 θ 值计算公式为：$\theta=\dfrac{360(L+\delta)}{2\pi R}$。

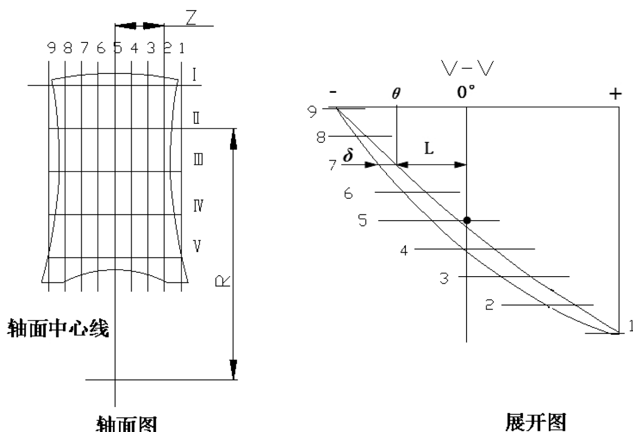


图 2-135 叶片轴面投影图和翼型

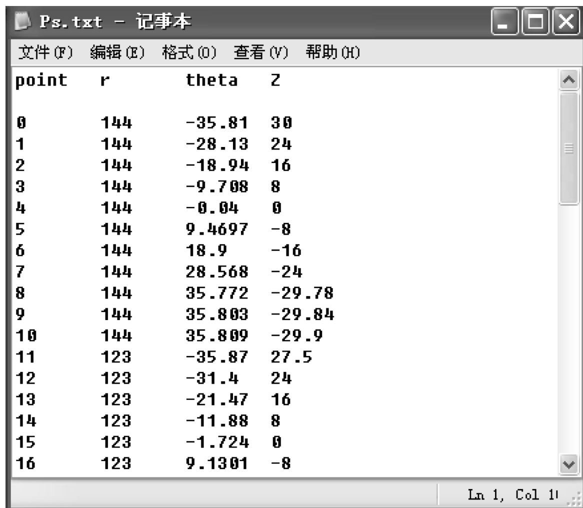
（4）创建点

方法 1：选择特征工具栏的【点】按钮右侧小三角形，选择【偏移坐标系】按钮，在弹出的偏移坐标系基准点窗口中【放置】栏中【参照】处用鼠标选取工作空间的坐标系，在【类型】栏选择圆柱，在打点坐标相对应的位置输入 R、θ、Z 值，单击【确定】按钮。

方法 2：新建 *. txt 文件，并命名为 Ps. txt，打开 Ps. txt，把工作面翼型上点的数据按

图 2-136 格式输入，然后保存，把 Ps. txt 文件改成 Ps. ibl（或者 Ps. pts），选择特征工具栏的【点】按钮右侧小三角形，选择【偏移坐标系】按钮，跳出的偏移坐标系基准点窗口，在【参照】处用鼠标选取工作空间的坐标系，在【类型】栏选择圆柱，单击【导入】按钮，导入 Ps. ibl 文件，单击【确定】按钮，如图 2-137 所示。

注意：Ps. txt 文件中不同两点需另起一行进行输入，同时各点的 R、θ、Z 值之间必须以相同的 3～10 个字符的间隔输入，并与相应的标题对正为一列。



point	r	theta	Z
0	144	-35.81	30
1	144	-28.13	24
2	144	-18.94	16
3	144	-9.708	8
4	144	-0.04	0
5	144	9.4697	-8
6	144	18.9	-16
7	144	28.568	-24
8	144	35.772	-29.78
9	144	35.803	-29.84
10	144	35.809	-29.9
11	123	-35.87	27.5
12	123	-31.4	24
13	123	-21.47	16
14	123	-11.88	8
15	123	-1.724	0
16	123	9.1301	-8

图 2-136　文本输入格式图



图 2-137　生成点图

（5）控制曲线生成

单击特征工具栏的样条曲线【曲线】按钮，把步骤（4）生成数据点按单个翼型工作面点连接，单击【通过点】→【完成】，在弹出来的菜单管理器，选择【样条】→【单个点】→【添加点】，如图 2-138 所示，然后按顺序一一地选取工作空间的点，单个等值线上点连接完后单击【确定】→【完成】。按相同方法，对其他几条翼型工作面曲线通过样条曲线连接，结果如图 2-139 所示。



图 2-138　曲线连接设置

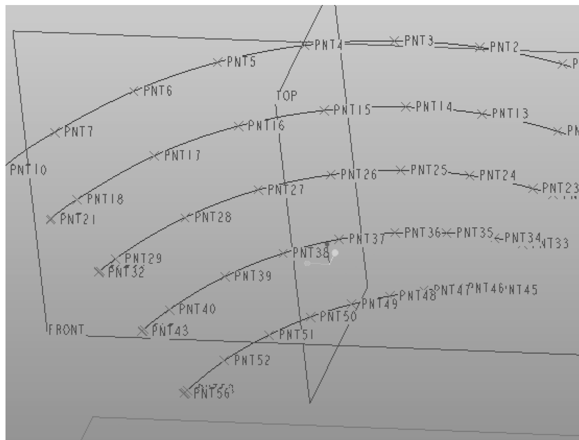


图 2-139　翼型工作面完成曲线连接图

（6）生成叶片背面控制点、控制线

按步骤（4）~步骤（5）对翼型背面通过打点、样条曲线连接，结果如图 2-140 所示。

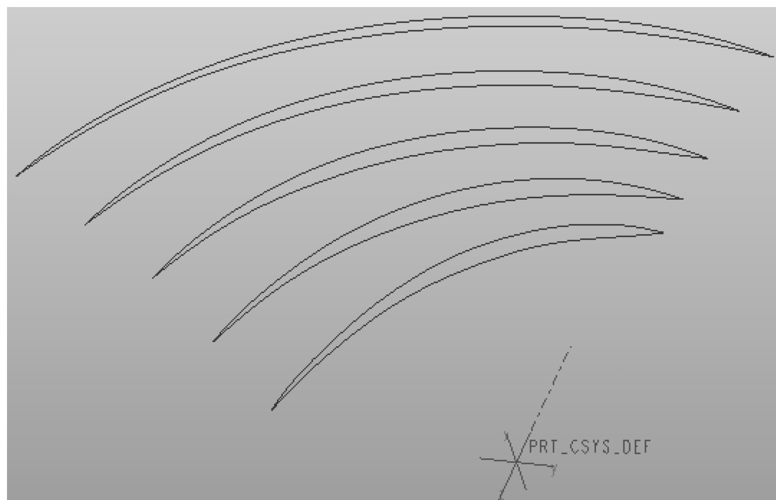


图 2-140　翼型背面曲线

（7）生成进出口边控制线

单击特征工具栏的样条曲线按钮，单击【通过点】→【完成】，在弹出来的菜单管理器中，选择【样条】→【单个点】→【添加点】，然后按顺序选取叶片进口边（出口边）上的特征点，【确定】→【完成】，结果如图 2-141 所示。

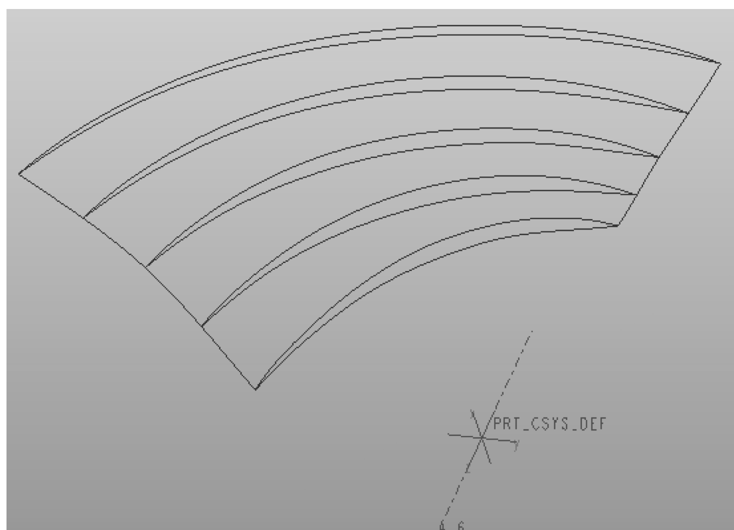


图 2-141　进口边曲线

（8）工作面和背面曲面混合

在特征工具栏选取【边界混合】，在【第一方向链收集器】从轴流泵轮缘到轮毂依次选取翼型工作面曲线，在【第二方向链收集器】选取叶片进口边、出口边，如图 2-

142 所示，单击☑ 〇〇【特征预览】按钮进行预览，预览没有问题则单击✔按钮。以相同的方法对叶片背面进行曲面混合。

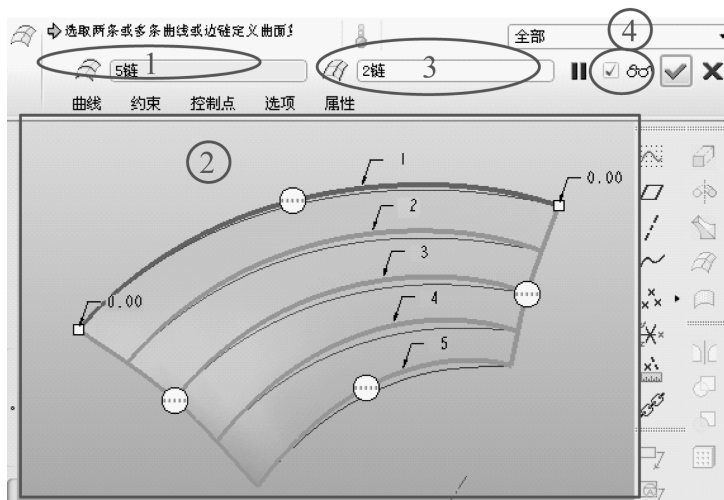


图 2-142　边界混合预览图

（9）轮毂、轮缘曲面混合

在特征工具栏选取【边界混合】，在【第一方向链收集器】选取工作面轮毂边、背面的轮毂边两条边，如图 2-143 所示，单击✔按钮，完成边界混合，以相同的方法对叶片轮缘边进行边界混合。

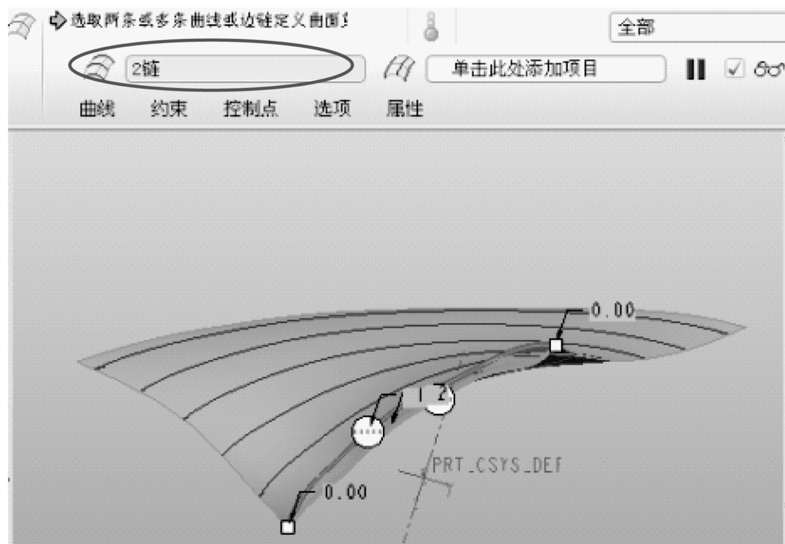


图 2-143　轮毂延伸示意图

（10）叶片工作面、背面进行曲面合并

在特征工具栏选取【合并】，同时选取叶片背面、叶片工作面、轮毂面以及轮缘面，如图 2-144 所示，单击✔按钮，完成两曲面合并。

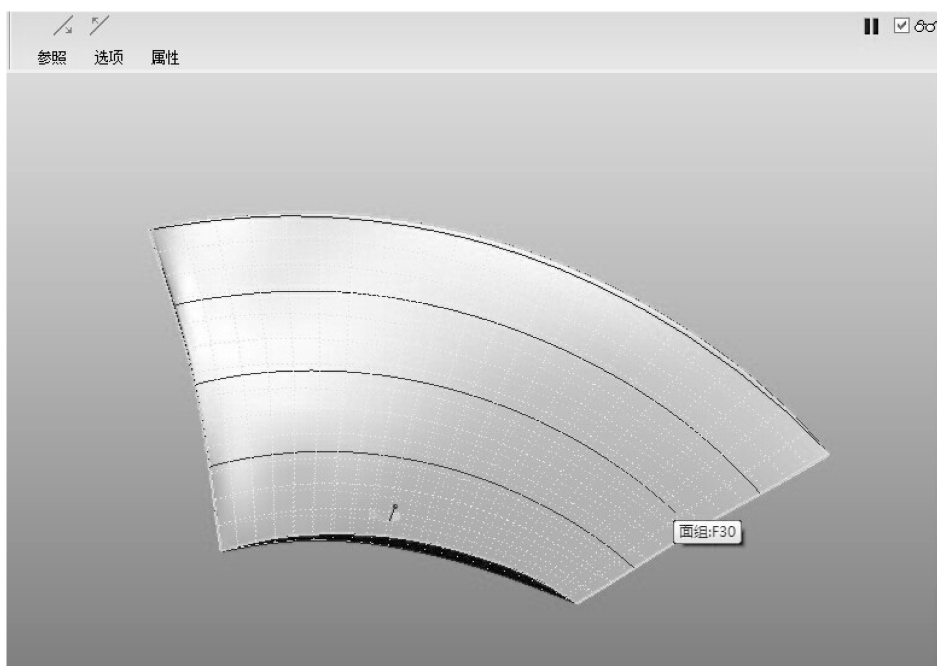


图 2-144　曲面合并图

（11）叶片实体化

选择合并后的曲面，单击【编辑】→【实体化】，单击按钮，完成实体化。通过选择模型显示工具条里的图标进行查看，当体的边界是白色线条时表明实体化成功，如图 2-146所示，边界已成白线，而如图 2-145 所示，是未实体化前的边界轮廓线。如此可辨别是否成功实体化。

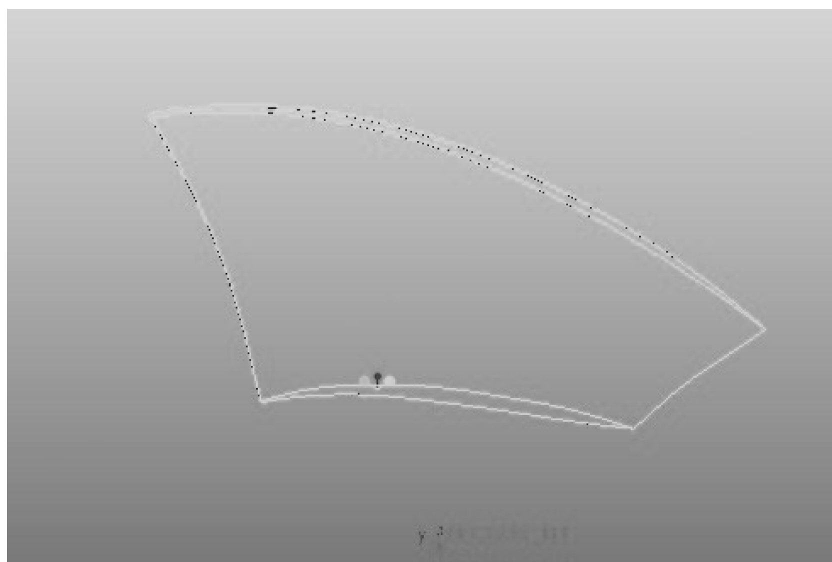


图 2-145　未实体化预览图

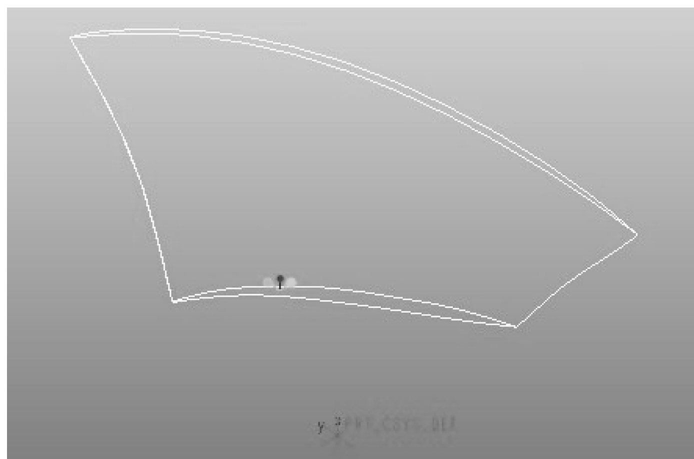


图 2-146　实体化预览图

（12）创建组

在工作界面左侧的【模型树】下，同时选取要归为一组的操作图标，单击鼠标右键，在弹出的菜单中，选择【组】，所选的特征如图 2-147 所示。

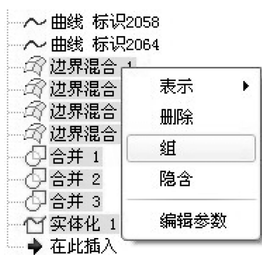


图 2-147　模型树中创建组

（13）叶片阵列

点选模型树下生成的【组】，在特征工具栏单击【阵列】按钮对叶片进行阵列，如图 2-148 所示，选择以【轴】为阵列中心，选取步骤（2）生成的轴，由于本模型有 3 个叶片，故输入阵列数为 3，阵列角度为 120°，单击按钮，完成阵列，结果如图 2-149 所示。

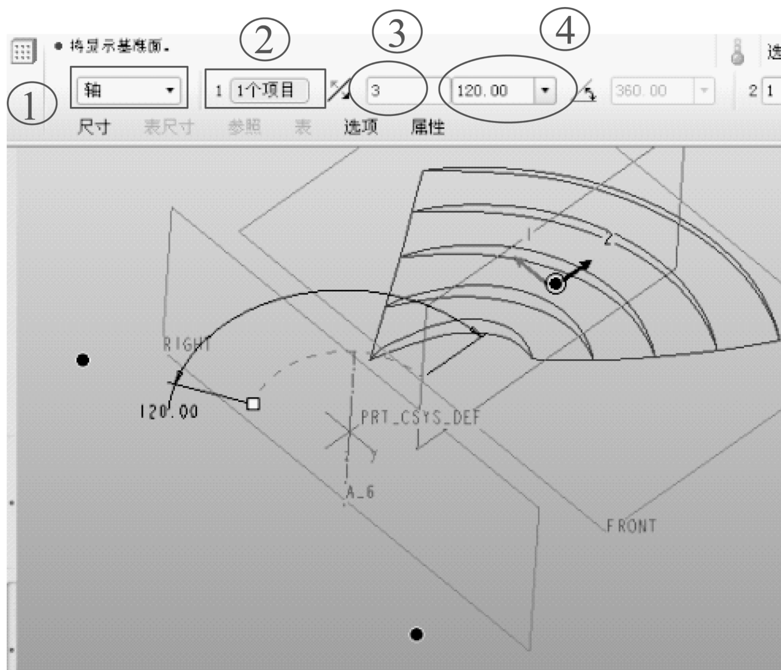


图 2-148　阵列设置及预览图

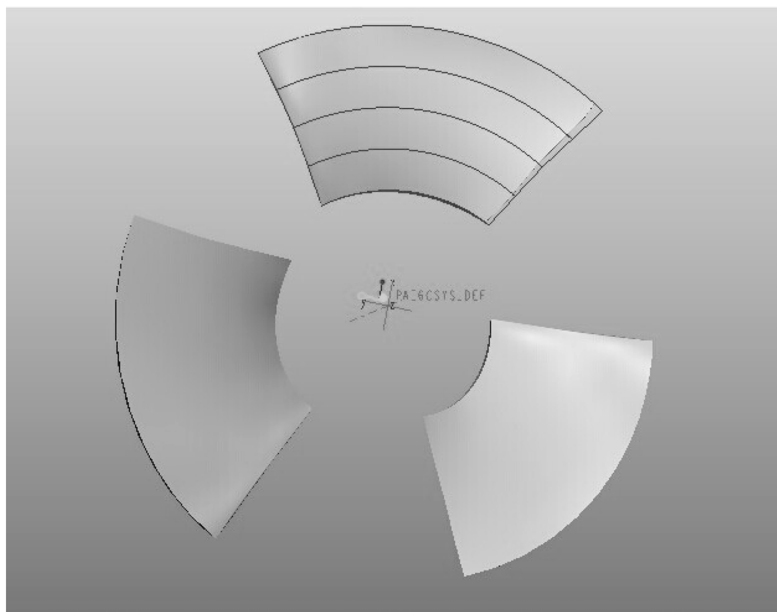


图 2-149　阵列完成图

（14）STP 格式文件保存

单击【文件】→【保存副本】，选择文件保存类型为＊. STP 格式，单击【确定】按钮，在弹出的【导出 STP】对话框中，勾选【实体】选项，如图 2-150 所示，单击【确定】按钮，完成保存。

（15）叶片文件保存

单击【文件】→【保存】→【确定】，完成轴流泵叶片的结构体造型。

（16）新建水体 prt 文件

单击【文件】→【新建】，或者直接单击标题栏的【新建】按钮，弹出的新建窗口如图 2-151 所示，在类型栏选择【零件】，在【名称】输入框输入需要保存水体的文件名称，如 Axial_water_imp，去掉勾选的【使用缺省模板】，然后单击【确定】按钮。在新文件选项窗口选择需要的模板单位，选择 mmns_part_solid，然后单击【确定】按钮。



图 2-150　导出 STP 文件

（17）创建旋转轴

单击特征工具栏的【轴】按钮，弹出【基准轴】对话框，在工作区域选取两平面 RIGHT 平面、TOP 平面，单击【确定】按钮。

（18）轴面图草绘

在特征工具栏单击按钮，在弹出【草绘平面】栏选取 TOP 平面，在【草绘方向】处的参照一栏选取 RIGHT 平面，单击【草绘】按钮，并按照轴流泵结构尺寸绘制泵叶轮壳空

间旋转截面边界线，单击【确定】按钮完成曲线绘制。由于在上述操作步骤中未进行轮缘、轮毂的延伸，所以在草绘水体时，将外径减小，内径增大，从而保证叶片能够准确地切割水体。

（19）旋转轴面图

在特征工具栏依次单击【旋转】→【放置】→【草绘】→【定义】，在弹出的【草绘】对话框中的【草绘平面】处选择【使用先前的】→【草绘】。进入草绘界面，选择【通过边创建图元】，如图 2-152 所示，在弹出【类型】对话框，选择【单一】，逐条选取步骤（18）绘制的轴面图线，全部选取完成单击【关闭】按钮，单击✔按钮，完成曲线绘制。然后在选项处选择【作为实体旋转】，单击后的空白框，选择工作区间的旋转轴，输入旋转角度 360，结果如图 2-153 所示，单击✔按钮，完成实体旋转。

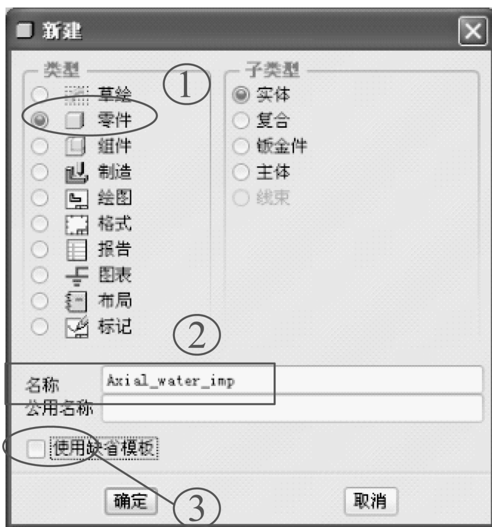


图 2-151　新建零件

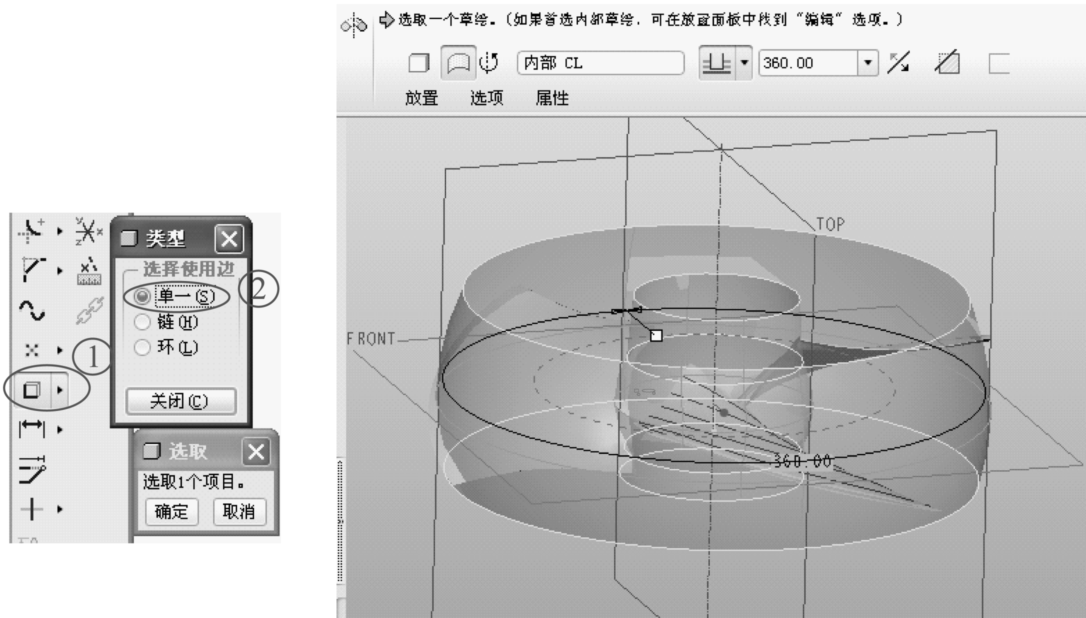


图 2-152　使用通过边创建图元

图 2-153　曲面旋转示意图

（20）切割水体

单击【插入】→【共享数据】→【自文件】，选择步骤（14）保存的 Axial_imp. stp 文件，单击【打开】按钮，在弹出的对话框中的【数据导入为】处选择【切口】，单击【确定】按钮，如图 2-154 所示。旋转体中切除叶片，留下的是水体实体，结果如图 2-155 所示。

（21）文件保存

单击【文件】→【保存】，单击【确定】按钮，完成轴流泵叶轮的三维造型。

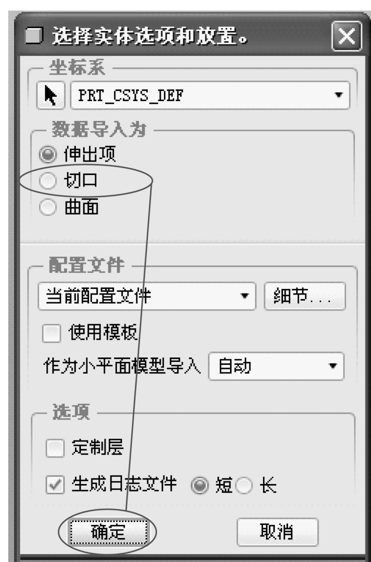


图 2-154　切口插入

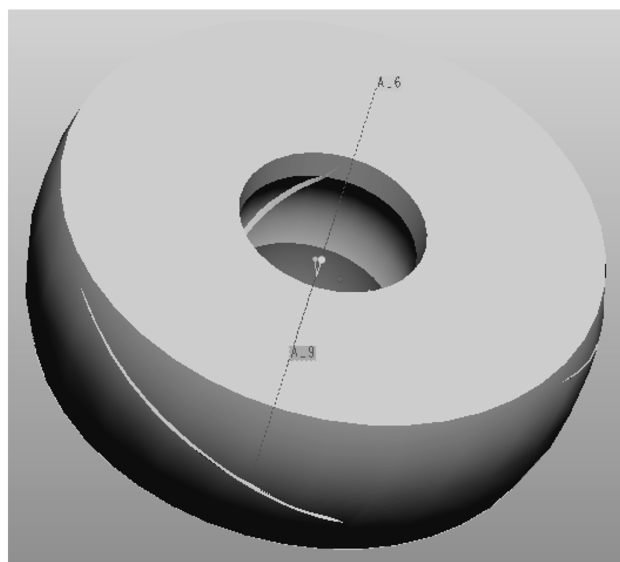


图 2-155　叶轮水体图

2.4　混流泵叶轮造型

（1）新建叶片 prt 文件

启动 Pro/E，单击【文件】→【设置工作目录】，选择三维造型存储目录。单击【文件】→【新建】，或者直接单击标题栏的按钮，跳出的【新建】窗口如图 2-156 所示，在类型栏选择【零件】，在【名称】处输入需要保存文件名称如 mix_imp，去掉勾选的【使用缺省模板】，单击【确定】按钮。在新文件选项窗口选择需要的模板，如图 2-157 所示，一般选择 mmns_part_solid，单击【确定】按钮。

（2）创建旋转轴

单击特征工具栏的【轴】按钮，弹出【基准轴】对话框，在工作区域选取两平面 RIGHT 平面、TOP 平面，单击【确定】按钮。



图 2-156　新建零件

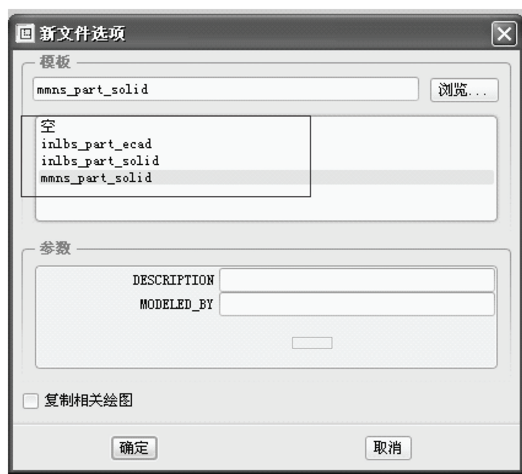


图 2-157　设置单位

（3）柱坐标点确定

为确定轴面图在柱坐标中的 R、θ、Z 值，首先需要确定基准位置，如图 2-158 所示，然后根据坐标表，结合木模型尺寸，按等值线的方法打点。例如在图 2-158 中，与坐标（C，7）相对应的数是 220.494，此为 R 值（可直接通过测量该点到轴线的距离获得）；与横坐标 C（包角截线）相对应的 60°如图 2-158 右侧图所示，此为 θ 值。Z 的确定如图 2-158 所示，先确定一基准线（本书选择 0 号截线为基准），根据纵坐标 7 截线找到图 2-158 中垂直线 7，测出垂直线截线 7 到基准线的距离，即为 $Z = -105$。所以与坐标（C，7）相对应的（R，θ，Z）值为（220.494，60°，-105）。

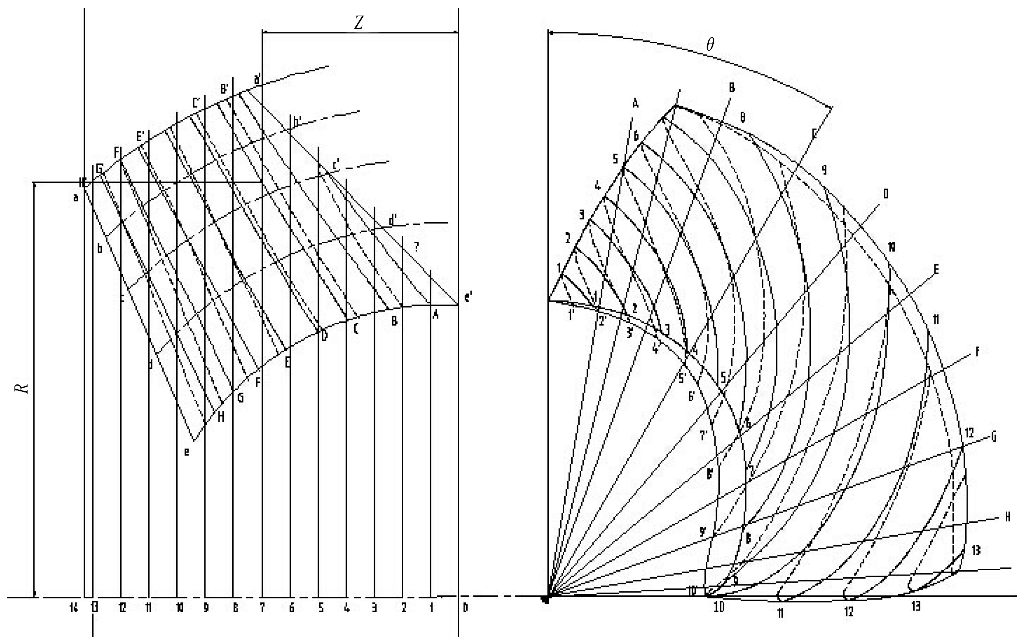


图 2-158　坐标确定示意图

（4）创建点

单击特征工具栏的图标右侧小三角形，选择图标，弹出偏移坐标系基准点窗口【放置】标签，如图 2-159 所示，在【参照】处用鼠标点取工作空间的坐标系，如 PRT_CSYS_DEF（坐标系），图 2-160 所示，在【类型】处选择圆柱，输入 R、θ、Z 值，单击【确定】按钮。

（5）控制曲线生成

将木模型线数据按等值线的规律输入后，单击特征工具栏的样条曲线按钮，【通过点】→【完成】，在弹出的菜单管理器中选择【样条】→【单个点】→【添加点】，如图 2-161 所示，然后按点的输入顺序一一地选取工作空间的点，单个等值线上点连接完后单击【确定】→【完成】。结果如图 2-162所示。



图 2-159　输入点设置

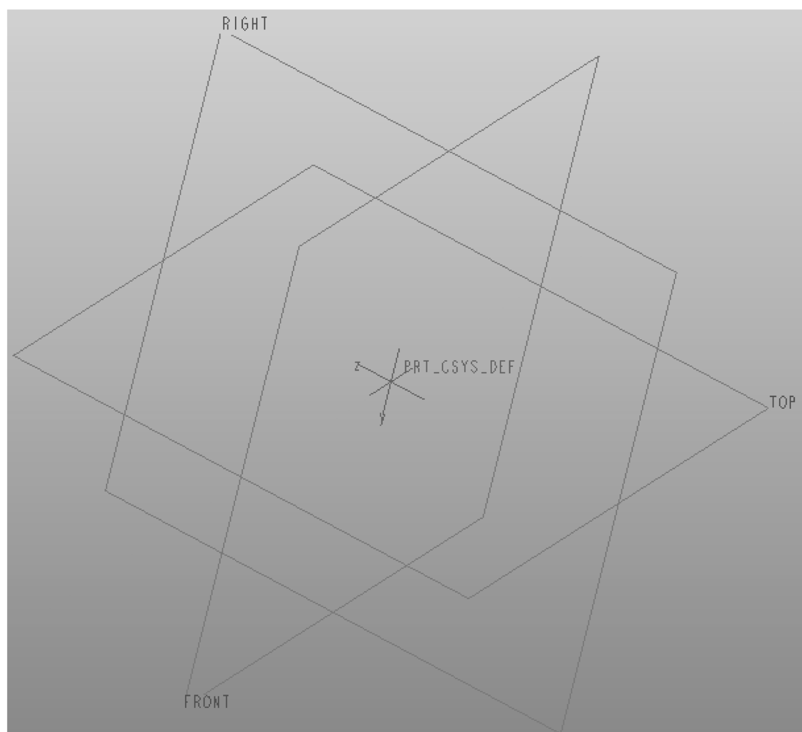


图 2-160　选取坐标系



图 2-161　曲线连接设置

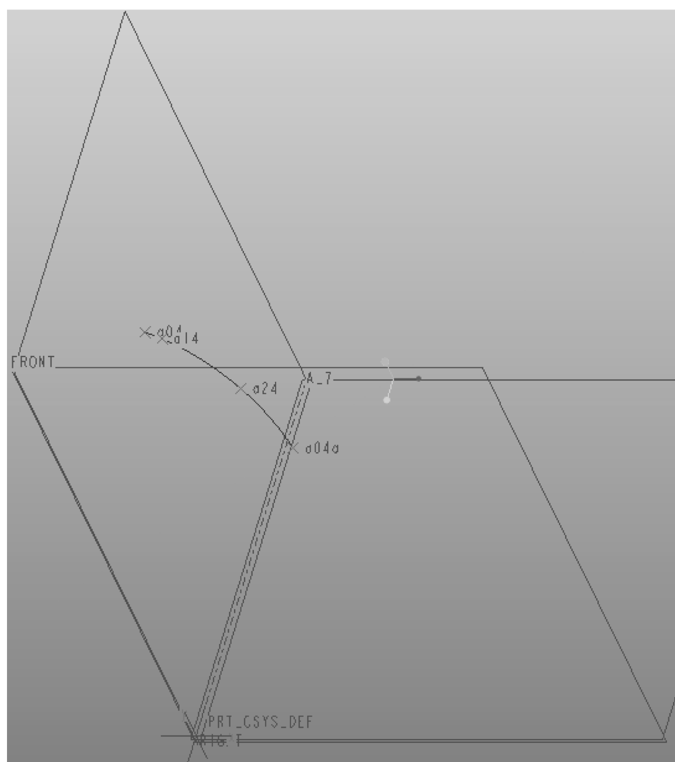


图 2-162　完成曲线连接图

（6）工作面背面曲线生成

按步骤（4）、（5）打点输入，用样条曲线按等值线规律连接，把叶轮叶片工作面所有等值线连接起来，结果如图 2-163 所示。

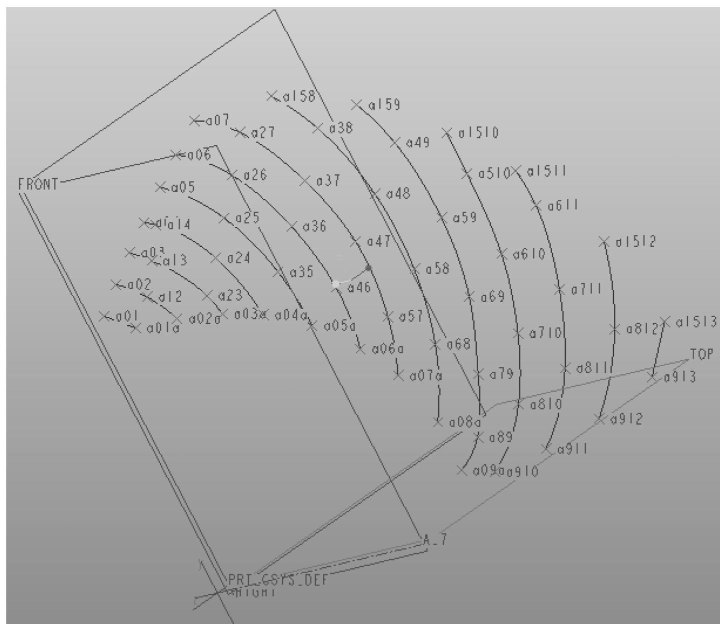


图 2-163　按等值线连接曲线图

（7）进、出口边连接

按步骤（4）、（5）打点输入，用样条曲线连接轮缘、轮毂、叶片进口边、叶片出口边，结果如图 2-164 所示。

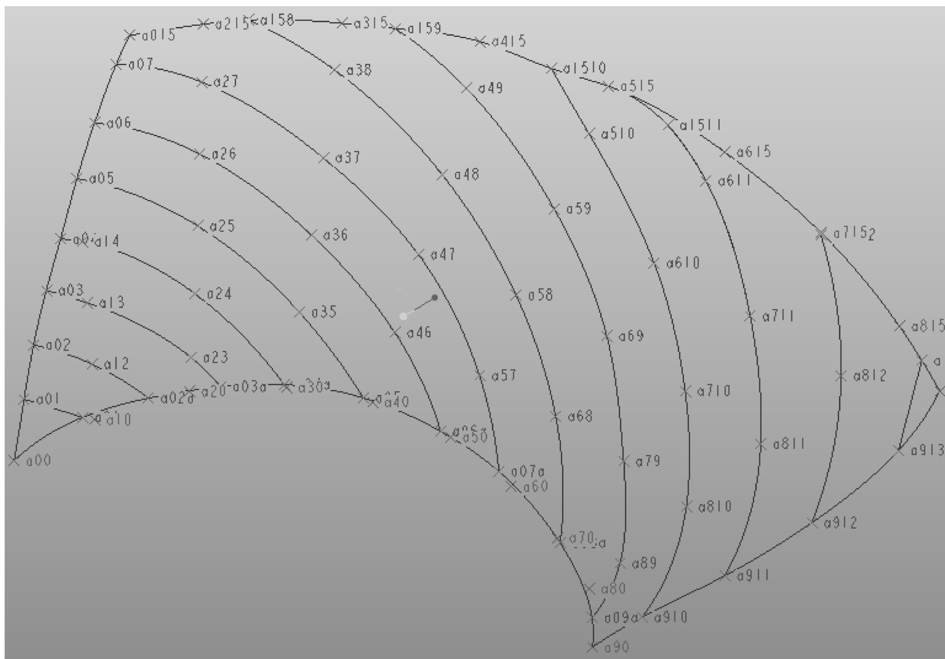


图 2-164　轮缘、轮毂点和曲线

（8）工作面曲面混合

在特征工具栏选取边界混合，在第一方向链收集器选取轮缘、轮毂两曲线，在第二方向链收集器选取叶片进口边、叶片出口边两曲线，如图 2-165 所示，在【选项】下面【影响曲线】处一一选择各等值线作为控制线，如图 2-166所示，单击进行预览，预览没有问题单击按钮。

（9）背面曲面混合

按步骤（3）～步骤（8）方法对混流泵叶片背面进行打点、连线、边界曲面混合，结果如图 2-167 所示。

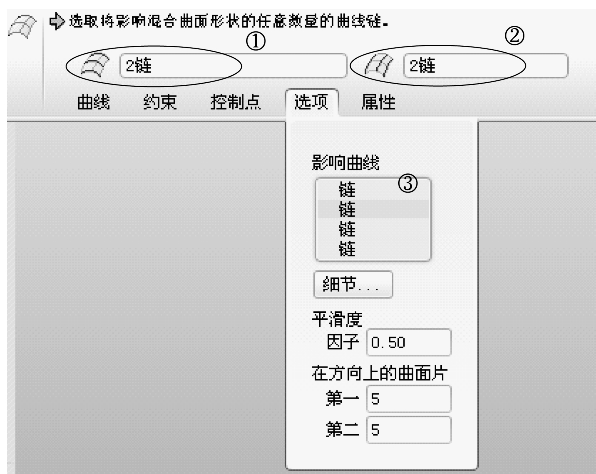


图 2-165　边界混合设置

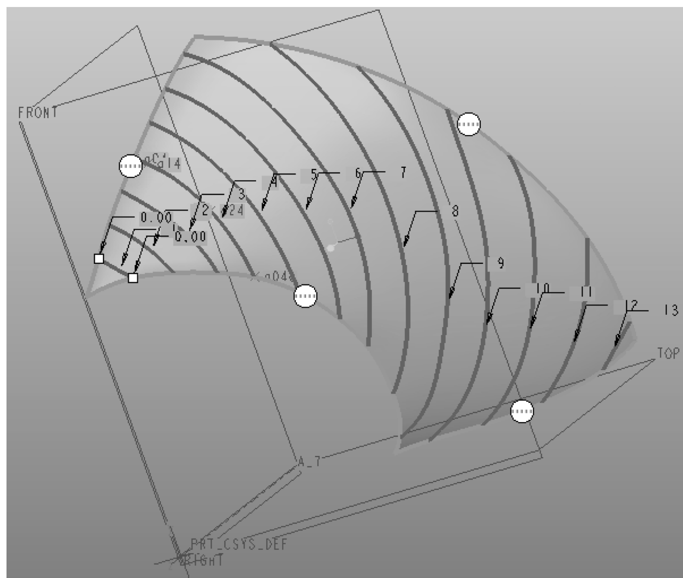


图 2-166　边界混合预览图

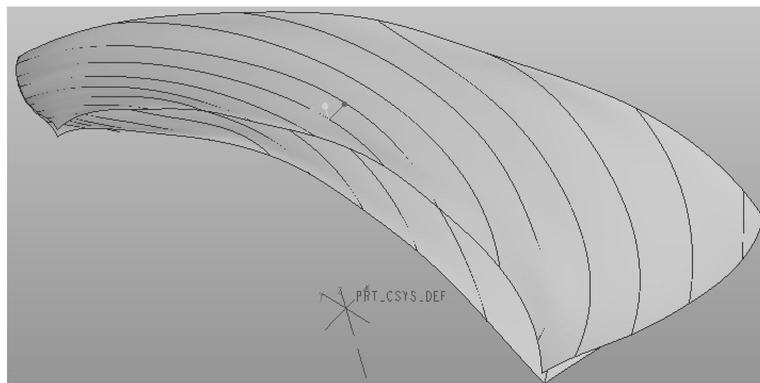


图 2-167　叶片背面曲面混合图

（10）曲面延伸

选取工作面曲面轮缘边界线，【编辑】→【延伸】，选择【沿原始曲面延伸曲面】，输入延伸距离 5mm，如图 2-168 所示，单击按钮，完成曲面延伸。按相同方式对工作面轮毂进行延伸，延伸距离设为 8mm，如图 2-169 所示。以相同的方法对叶片背面曲面轮缘、轮毂分别进行延伸。

（11）曲面边界混合

在特征工具栏选取【边界混合】，在【第一方向链收集器】选取刚由延伸得到的

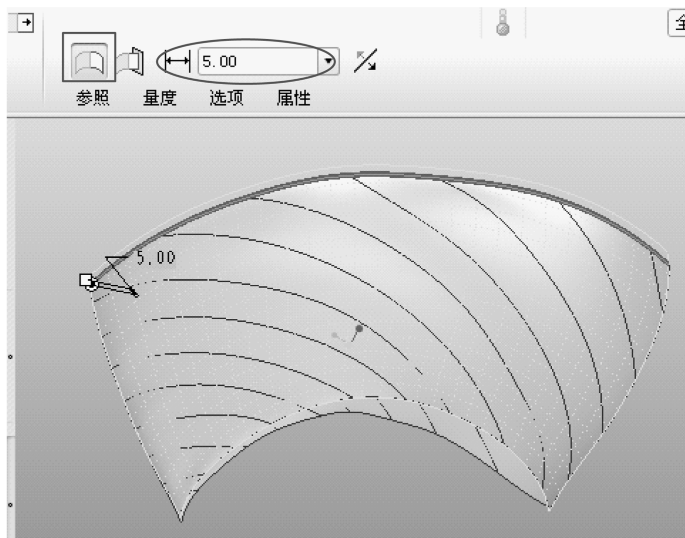


图 2-168　轮缘延伸示意图

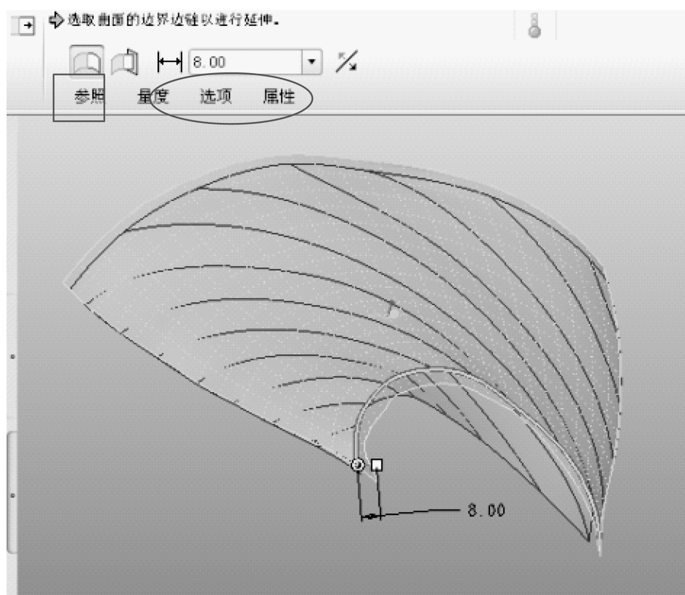


图 2-169　轮毂延伸示意图

工作面轮毂边、背面的轮毂边两条边，如图 2-170 所示，单击✔按钮，完成边界混合，按相同的方法对叶片轮缘、叶片进口边、叶片出口边都分别进行边界混合。

（12）曲面合并

在特征工具栏选取【合并】，同时选取叶片背面、叶片工作面、叶片轮毂面以及叶片轮缘面，如图 2-171 所示，单击✔按钮，完成两曲面合并。

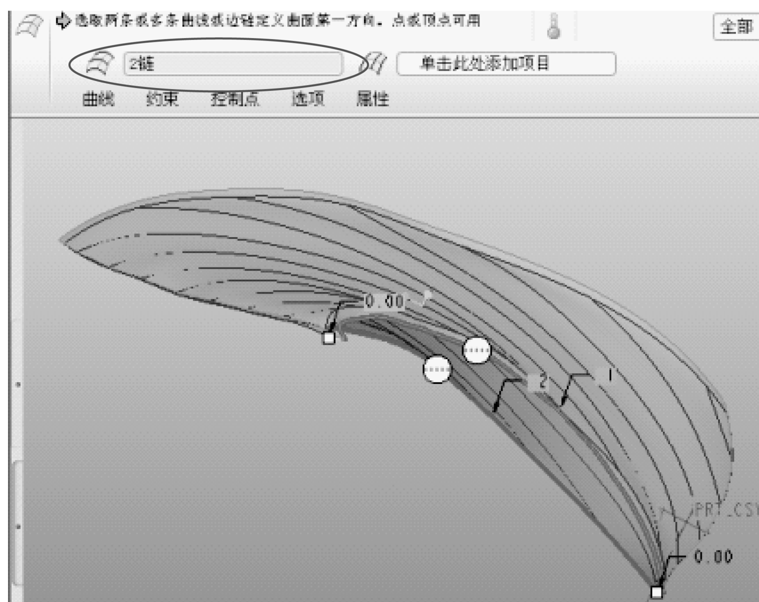


图 2-170　轮毂混合示意图

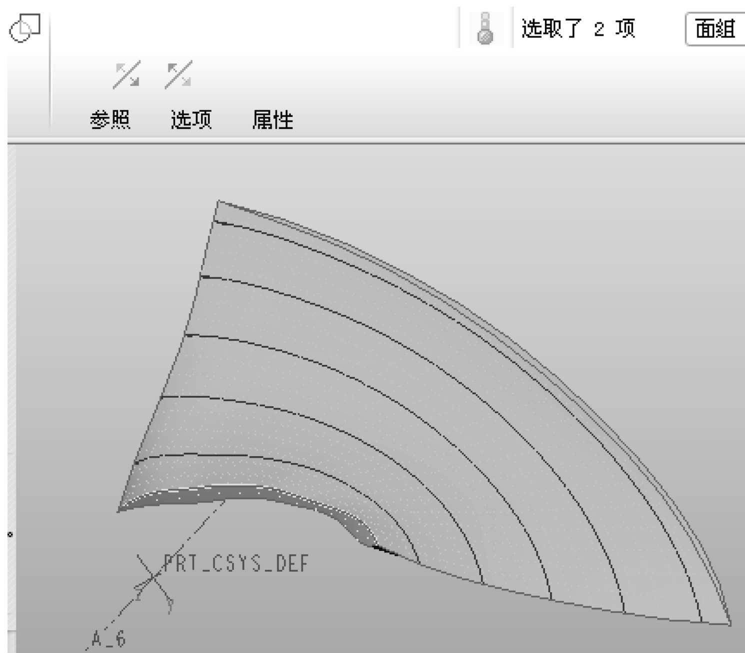


图 2-171　曲面合并图

（13）叶片进、出口边倒圆角

在特征工具栏选取【倒圆角】，选择【集】模式，同时选取叶片工作面和背面的进口边，如图 2-172 所示，输入倒圆角的值 2，单击完成体的倒圆角。按相同的方法，对叶片出口边进行倒圆角。

（14）创建组

在工作界面左侧的模型树下，同时选取要归为一组的操作图标，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中，选择【组】，将生成体的关键部分放在一组，如图 2-173 所示。

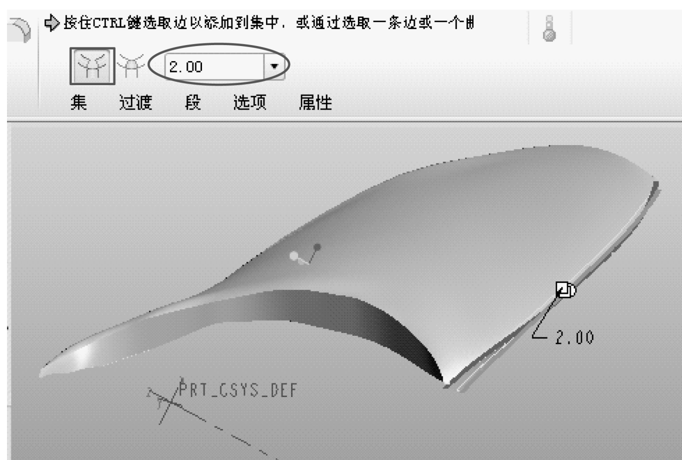


图 2-172　倒圆角设置

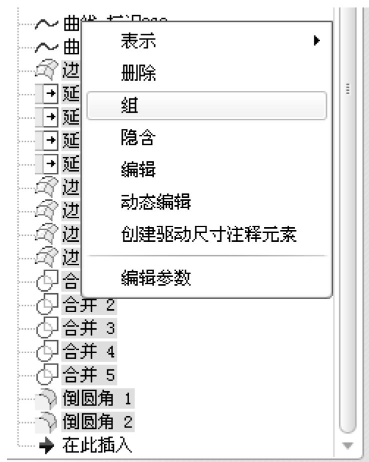


图 2-173　模型树中创建组

（15）叶片阵列

单选模型树下生成的组，在特征工具栏选取【阵列】对叶片进行阵列，如图 2-174 所示，选择以【轴】为阵列中心，选取步骤（2）生成的轴，由于本模型有 4 个叶片，故输入阵列数为 4，阵列角度为 90°，单击按钮完成阵列，结果如图 2-175 所示。

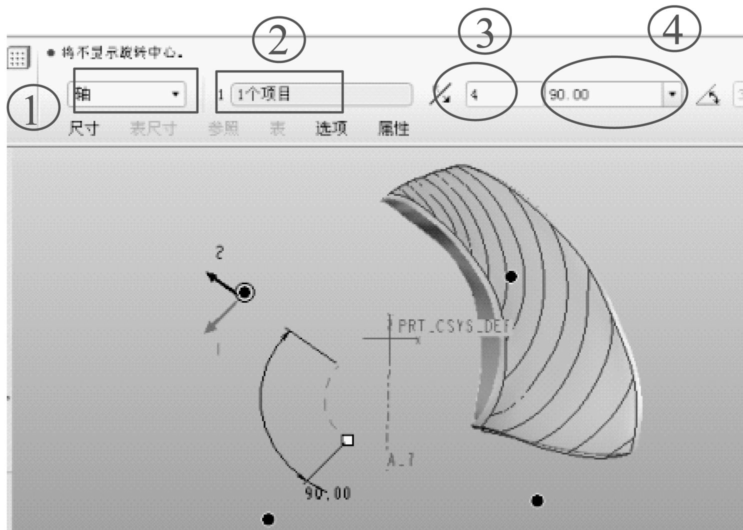


图 2-174　阵列设置及预览图

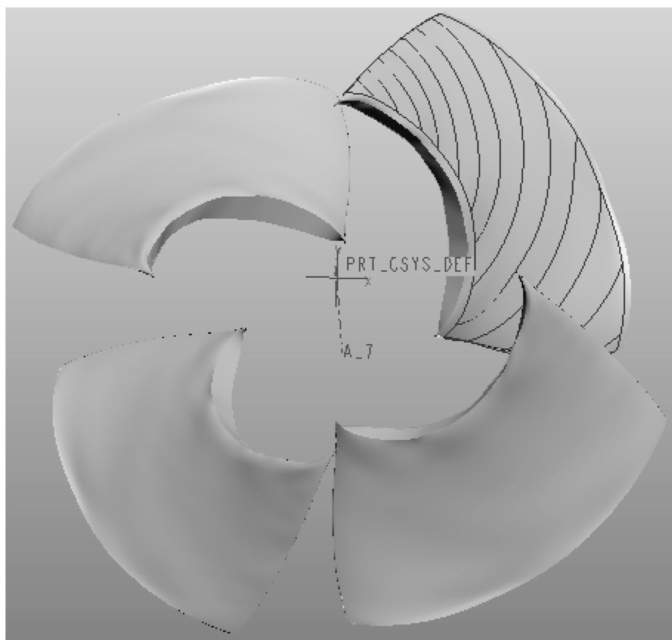


图 2-175　阵列完成图

（16）叶片实体化

选取阵列后的单个叶片，在【编辑】→【实体化】，单击完成体的实体化。按此步骤对其他几个叶片进行实体化。注意：通过选择模型显示工具条里的图标进行查看，当体的边界是白色线条时表明实体化成功，如图 2-176 所示，边界已成白线，而图 2-177 所示，是未实体化时的边界轮廓线。如此可辨别是否已成功实体化。

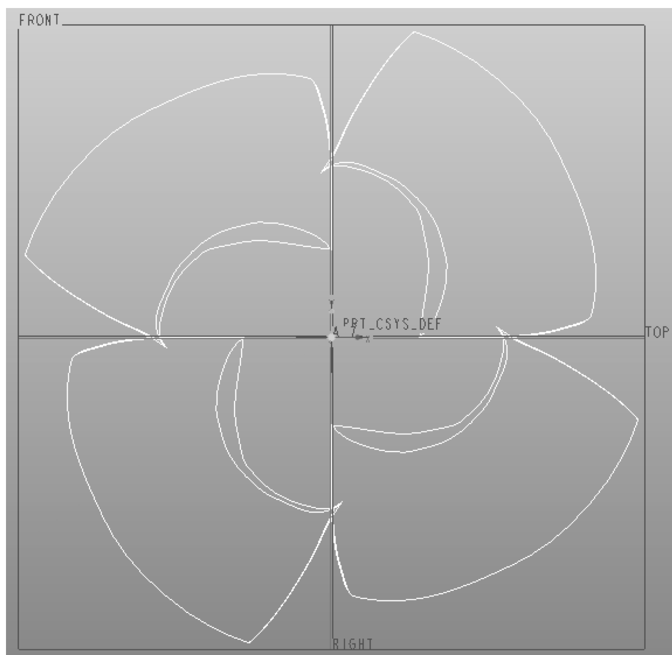


图 2-176　实体化预览图

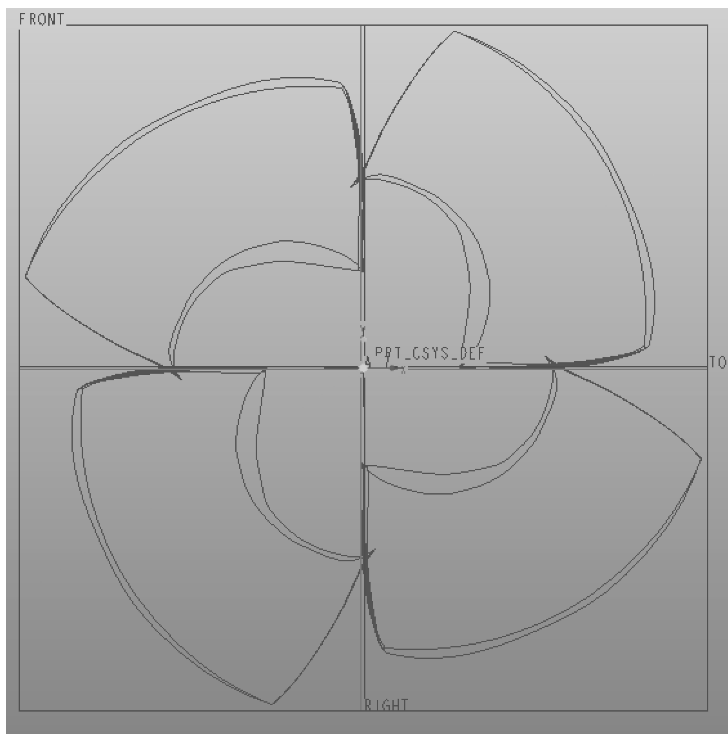


图 2-177　未实体化预览图

（17）STP 格式文件保存

【文件】→【保存副本】，选择文件保存类型为 *.STP 格式，单击【确定】按钮，在弹出的【导出 STP】对话框中，勾选【实体】选项，如图 2-178 所示，单击【确定】按钮，完成保存。



图 2-178　导出 STP 文件

（18）原文件保存

【文件】→【保存】→【确定】，完成轴流泵叶片的结构体造型。

（19）新建水体 prt 文件

选择【文件】→【新建】，或者直接单击标题栏的 【新建】图标，弹出的新建窗口如图 2-179 所示，在类型栏选择【零件】，在【名称】处输入需要保存水体的文件名称，如 mix_water_imp，去掉勾选的【使用缺省模板】，然后单击【确定】按钮。在新文件选项窗口选择需要的模板，如图 2-180 所示，然后单击【确定】按钮。

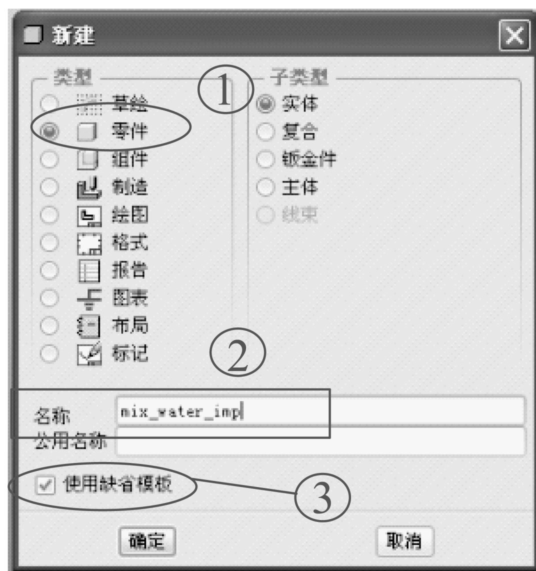


图 2-179　新建零件



图 2-180　设置基本单位

（20）创建旋转轴

单击特征工具栏的【轴】，弹出【基准轴】对话框，在工作区域选取两平面 RIGHT 平面、TOP 平面，如图 2-181 所示，单击【确定】按钮。

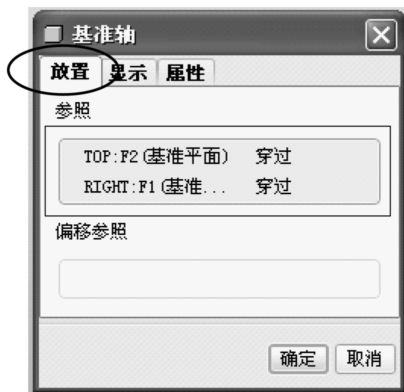


图 2-181　新建轴

（21）轴面图草绘

在特征工具栏单击草绘按钮，在弹出的草绘对话框中，在【草绘平面】处选取 TOP 平面，在【草绘方向】处的参照，选取 RIGHT 平面，单击【草绘】，并按照混流泵结构尺寸绘制泵叶轮壳空间旋转截面边界线，如图 2-182 所示。单击✔按钮，完成曲线绘制。

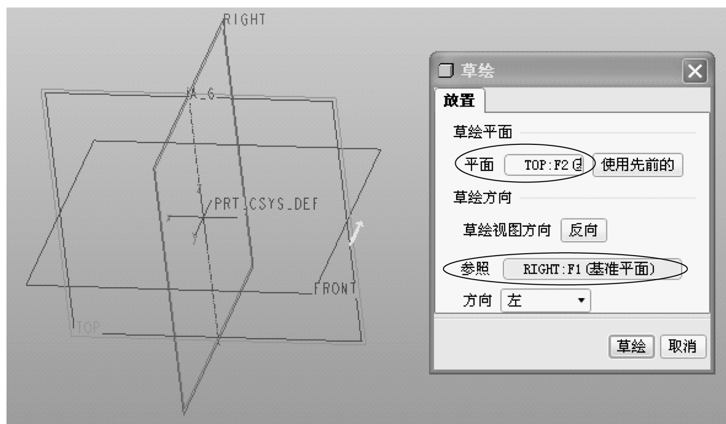


图 2-182　草绘平面确定

（22）旋转轴面图

在特征工具栏单击【旋转】，选择【放置】→【草绘】→【定义】，在弹出的草绘对话框中，在【草绘平面】处选择【使用先前的】→【草绘】。进入草绘界面，通过【使用通过边创建图元】，如图 2-183 所示，在弹出【类型】对话框，选择【单一】，逐一选取步骤（21）绘制的轴面图线，全部选取完成后单击【关闭】，单击按钮完成曲线绘制。然后在选项处选择【作为实体旋转】，选中后的空白框，选择工作区间的旋转轴，输入旋转角度 360°，如图 2-184 所示，单击完成实体旋转。



图 2-183　使用通过边创建图元

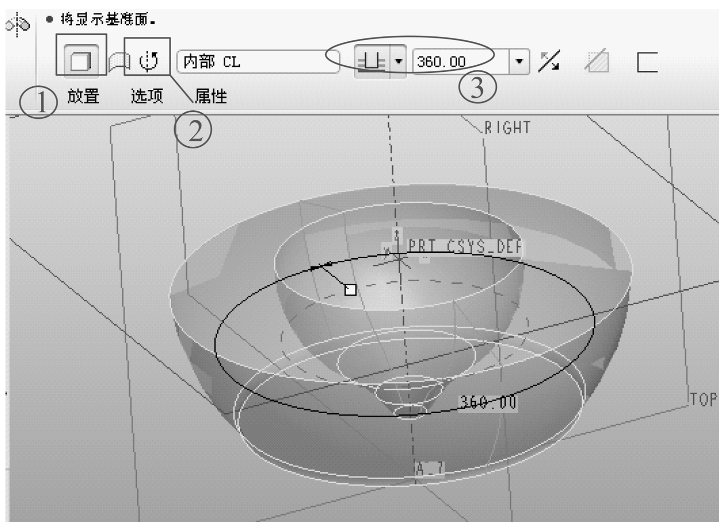


图 2-184　曲面旋转示意图

（23）导入叶片，切割水体

如图 2-185 所示，选择【插入】→【共享数据】→【自文件】，选择步骤（17）保存的 mix_imp. stp 文件，单击【打开】按钮。如图 2-186 所示，在弹出的对话框中的【数据导入为】处选择【切口】，然后单击【确定】按钮。旋转体中切除叶片，留下是水体，如图 2-187 所示。

（24）文件保存

【文件】→【保存】→【确定】，完成轴流泵叶轮的三维造型。

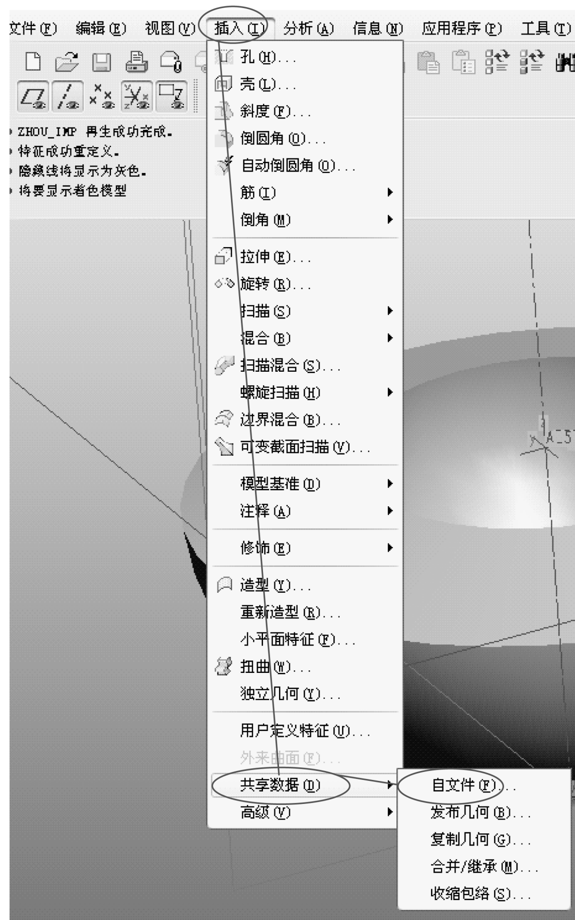


图 2-185　插入 STP 格式文件

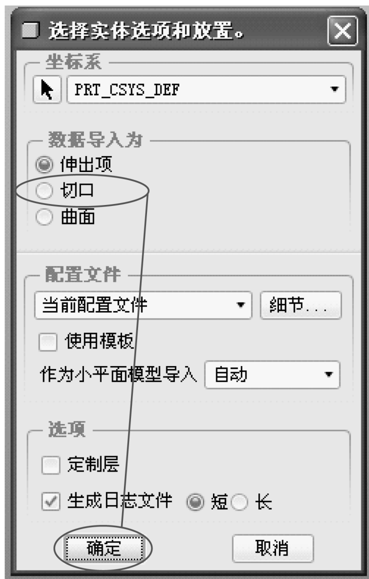


图 2-186　切口插入

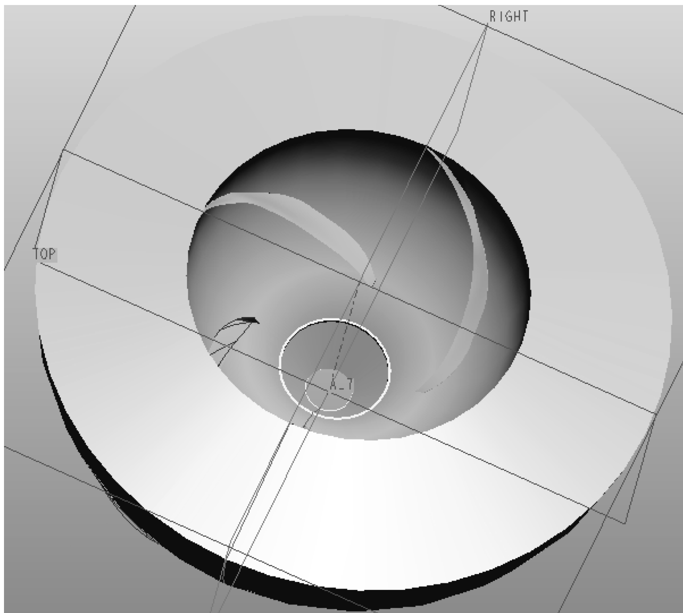


图 2-187　叶轮水体图

2.5　空间导叶水体的绘制

（1）创建 Part

启动 Pro/E 软件之后，单击【文件】→【新建】命令。这时会出现如图 2-188 所示对话框，在【类型】及【子类型】中分别选择单击【零件】及【实体】，在【名称】中输入 Part 的文件名，不选择【使用缺省模板】，单击【确定】按钮。

在【模板】栏选择 mmns_part_solid 模板，单击【确定】按钮，进入造型界面。

（2）创建基准轴

单击右侧工具栏中的/【基准轴】，会出现如 2-189 所示的基准轴命令对话框。按住【Ctrl】键，同时选择 RIGHT 平面和 TOP 平面，单击【确定】按钮来创建轴。轴创建后如图 2-190 所示。



图 2-188　创建 Part



图 2-189　基准轴命令对话框

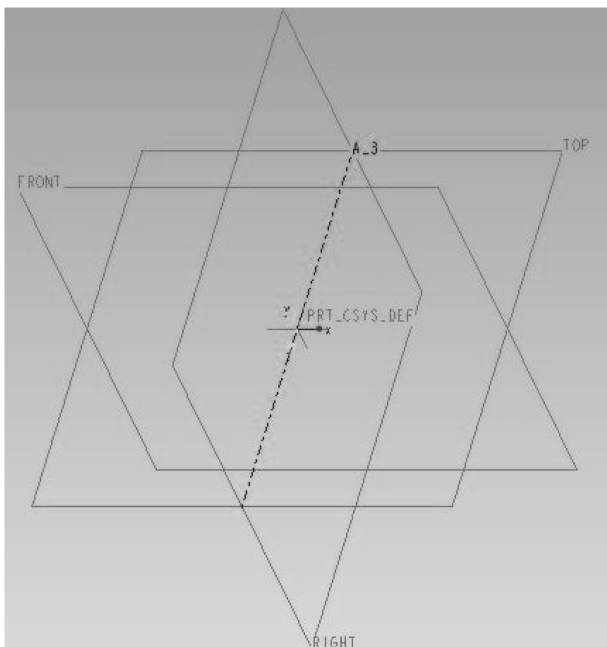


图 2-190　创建轴

（3）空间导叶图样和数据读取

使用打点法需要整理叶片工作面及背面上各点的坐标值，且为圆柱坐标系中的坐标值，即径向距离 R、角度 θ、轴向距离 Z。图 2-191 和图 2-192 所示的为读取数据的过程。图 2-191 上任意一点到下方水平参照线的距离为 R 值，至左侧垂直参照线的距离为 Z 值。图 2-192 上，任意一点至圆心的连线与水平参照线之间的角度为所需的角度值 θ。

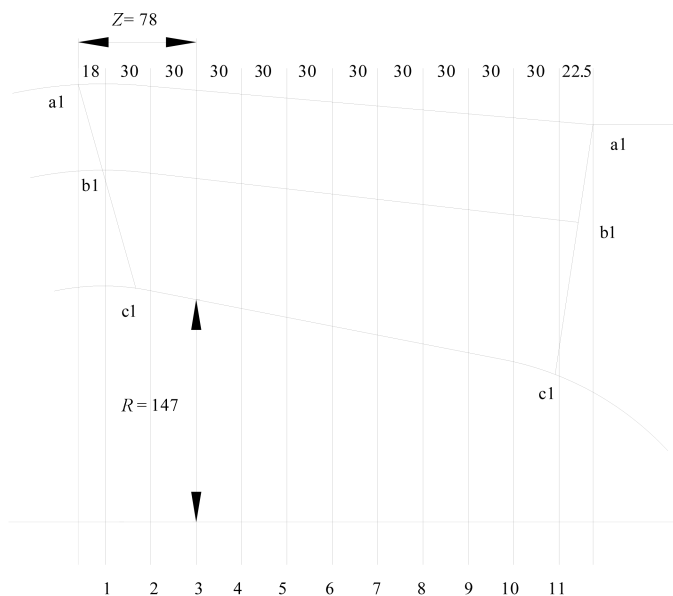


图 2-191　R 值和 Z 值的读取

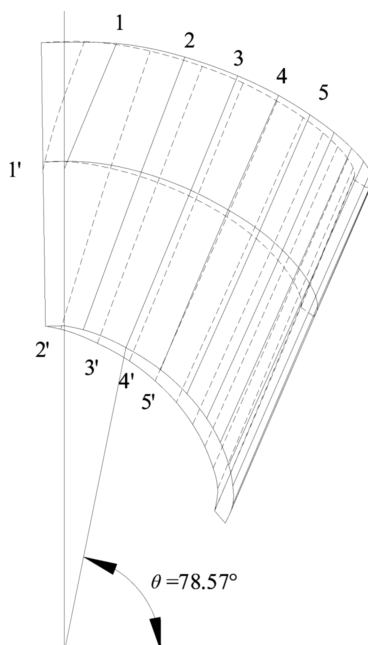


图 2-192　θ 值的读取

（4）输入坐标

单击右侧工具栏中的【基准点工具】→【偏移坐标系】，此时会出现【偏移坐标系基准点】对话框，如图 2-193 所示。将其参照选为【坐标系原点】，类型选为【圆柱】，并依次输入三维圆柱坐标的 *R* 值、*θ* 值、*Z* 值。以凸面内流线上第三个点为例，按照步骤（3）可得到 *R* 值、*θ* 值、*Z* 值分别为 147、78. 57°、78，在 *R* 轴、*θ* 轴、*Z* 轴下分别输入 147、78. 57、78，最终输入整条线后如图 2-194 所示。单击【确定】按钮后在窗口中出现整组点。

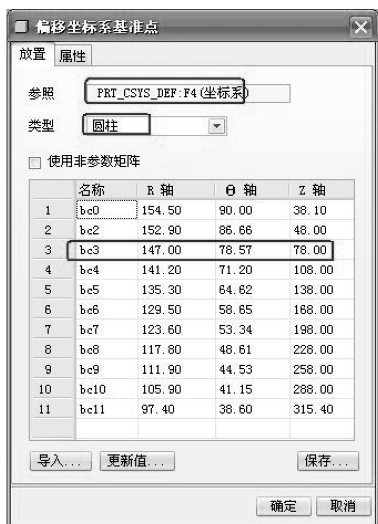


图 2-193　输入坐标

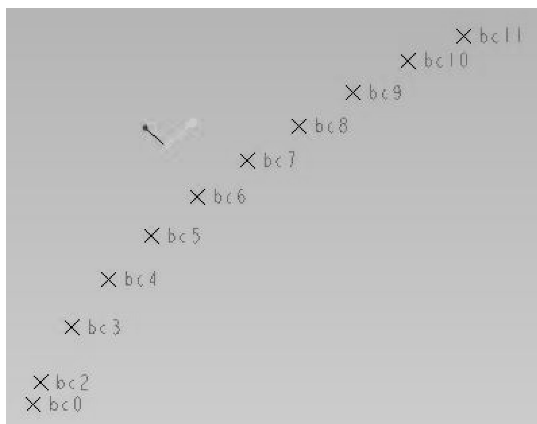


图 2-194　窗口中的坐标

（5）曲线连接

将流线坐标点用曲线连接。单击【曲线】按钮，在菜单管理器中单击【经过点】命令，会出现曲线命令的对话框，如图 2-195所示。依次单击【样条】→【整个阵列】，选择一组流线坐标点的起始点，单击【完成】按钮，退出。依次将凸面的三条流线坐标点连好，如图 2-196所示。



图 2-195　曲线连接命令对话框

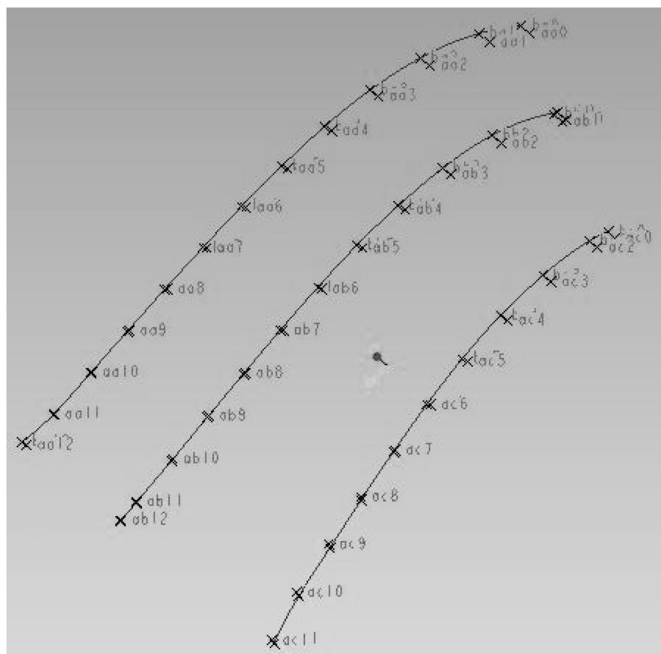


图 2-196　导叶凸面的三条流线

（6）边界混合

通过【边界混合】命令将三条线混合。单击【边界混合】按钮，出现曲线命令对话框，如图 2-197 所示。单击【选取项目】按钮，再依次选取三条流线，单击按钮，结束本次操作。混合的过程与结果分别如图 2-198 所示。



图 2-197　曲线命令对话框

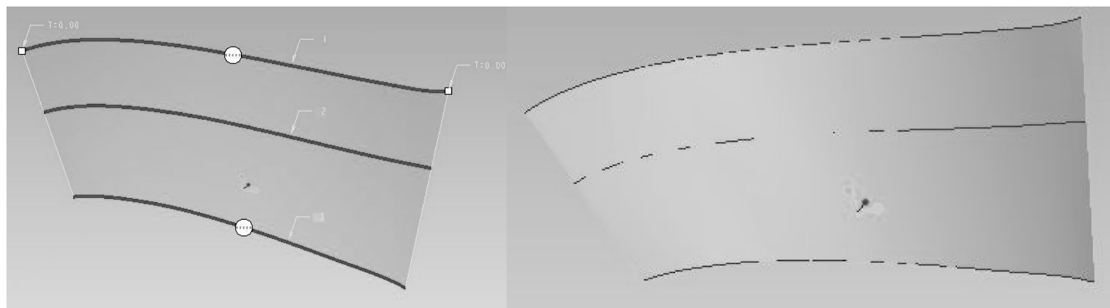


图 2-198　混合曲面

（7）阵列

将所得到的凸面进行阵列。单击【阵列】按钮，出现如图 2-199 所示的阵列命令对话框，在选项中选择轴，在项目中选择三维视图中的轴，将阵列数量选为 7，单击【设置阵列角度】按钮来设置分布角度，再单击按钮，生成 7 个凸面，阵列结果如图 2-200 所示。

按照上述过程，阵列对应的凹面。结果如图 2-201。



图 2-199　阵列命令对话框

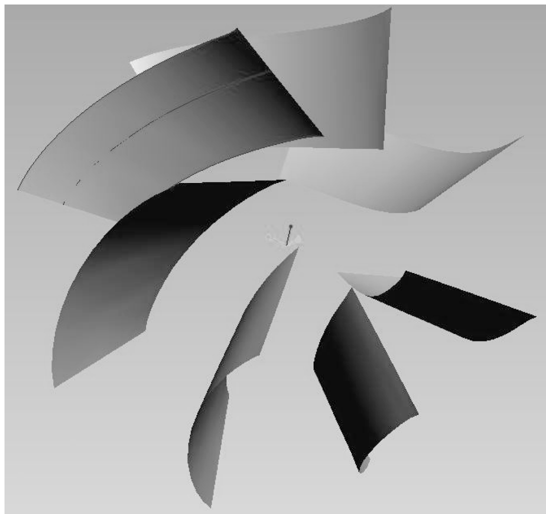


图 2-200　阵列凸面结果

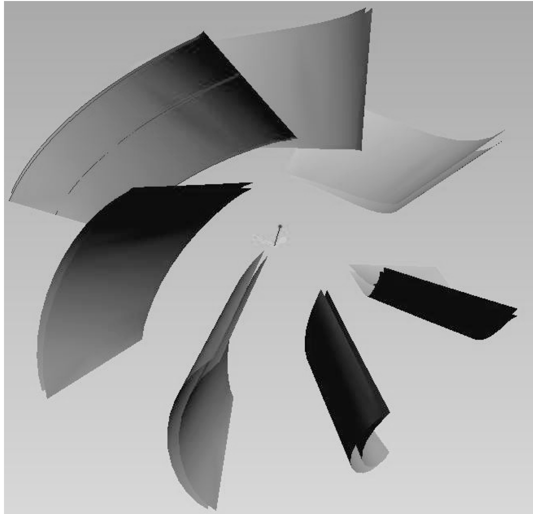


图 2-201　阵列凹面结果

（8）延伸

边界部分延伸。选择一个凸面的一条边，单击顶部菜单栏中的【编辑】按钮，会出现编辑命令菜单。选择【延伸】工具，此时弹出延伸选项栏，将延伸距离选择为 5，默认单位为 mm，单击按钮。依次将该凸面余下的三个边延伸，延伸距离均设定为 5。延伸过程和结果如图 2-202 和图 2-203 所示。

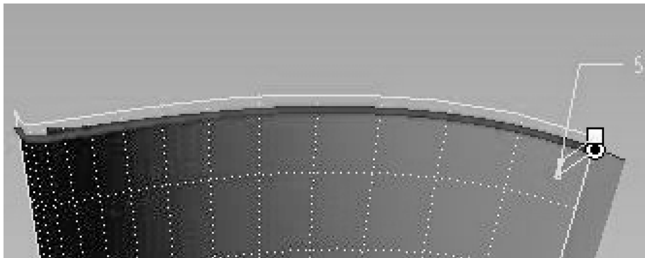


图 2-202　边界延伸过程

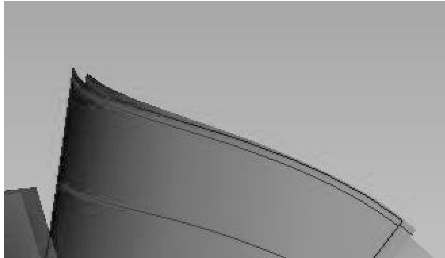


图 2-203　边界延伸结果

（9）边界混合及合并

参照步骤（6）的过程分别将导叶进口部分和出口部分连接。将四个分离的面（导叶凹面、凸面、进口部分和出口部分）合并为一个整体。同时按住【Ctrl】键选择两个面，再单击【编辑】按钮，在弹出的菜单中选择【合并】命令，此时出现黄色网格的面为已选中的面，如图 2-204 所示，单击【确定】按钮结束。需要注意的是，每次合并只能合并两个面，为了保证将每一个面合并而不遗漏，要记得将 N 个面合并成一个面共需执行 $N-1$ 次合并命令。之后按照上述过程将一个导流壳叶片的四个面合并在一起。根据步骤（8）和步骤

(9)，将七个叶片依次进行边缘延伸，边界合并。合并结果如图 2-205 所示。

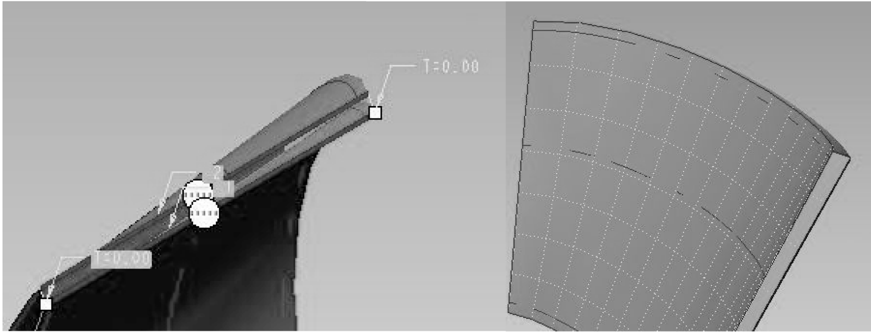


图 2-204　边界混合

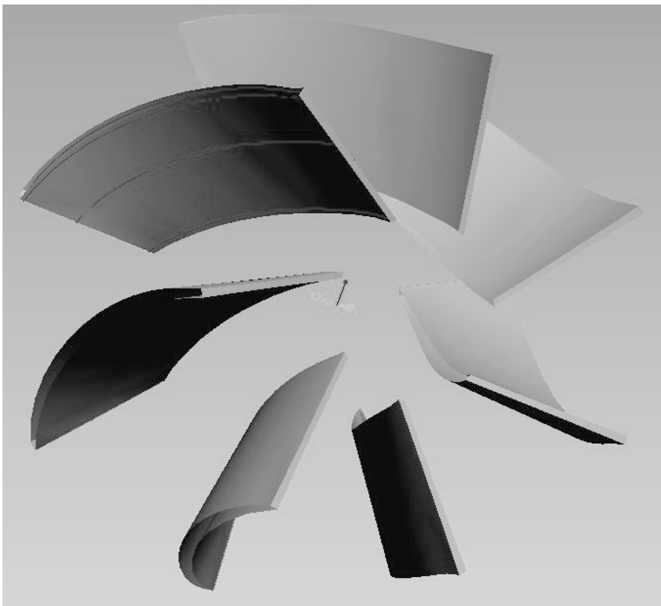


图 2-205　合并结果

(10) 导流壳水体的绘制

单击【草绘】按钮，此时会弹出草绘栏，如图 2-206 所示。其中【平面】、【草绘方向】、【草绘视图方向】、【参照】和【方向】均需按照实际情况自行选取，本例分别按照草绘平面为 RIGHT 平面，草绘参照为 TOP 平面，方向为顶来进行选取。



图 2-206　草绘栏

这时需要在草绘中绘制轴面图。需要注意的是，这次所画的是导流壳水体的轴面图，而不是导流壳叶片的轴面图。草绘操作的方式与 CAD 二维绘图软件相似，故不再介绍。此处仍然采用直接导入 CAD 文件的操作方法。

在顶部工具栏中选择【草绘】命令，在弹出的对话框中依次单击【数据来自文件】和【文件系统】按钮。找到之前保存的导流壳水体的轴面图文件（为 . dwg 格式），画好的导流壳水体 CAD 文件如图 2-207 所示，比例为 1 ∶ 1。单击【打开】按钮，弹出信息窗口单击【关闭】按钮。

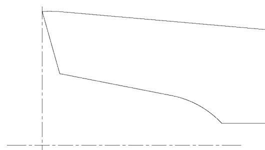


图 2-207　导流壳水体轴面图

当轴面图出现时，会看见中间的白色圆圈。右键单击该圆圈，拖动至原图轴线与中间线的交点处。再左键单击该圆圈，拖动至草绘界面的原点处，如图 2-208 所示。

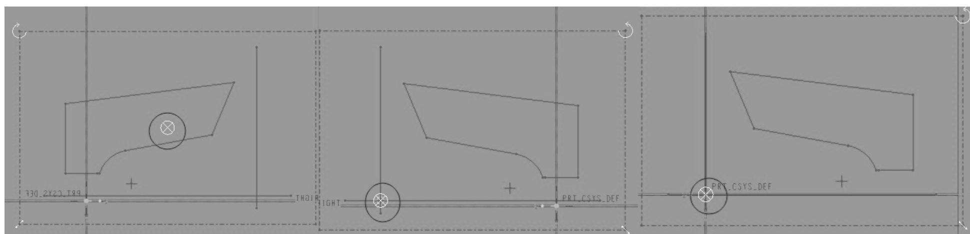


图 2-208　CAD 文件导入

【旋转/缩放】的比例改为 1，单击按钮，再单击按钮退出草绘界面。

单击左侧模型树中的【草绘】按钮，待视窗中的草绘图形变为红色后，再单击【旋转工具】图标，将旋转类型选为【曲面】，再选取一根轴，则视窗图中会出现黄色的旋转体，单击按钮，结束本次操作，结果如图 2-209 所示。

（11）导流壳水体与叶片的合并

该步具体操作参考步骤（9）中的合并命令，这次操作需要依次合并导流壳水体外层面与导流壳叶片的面，合并好后会出现一个被叶片切掉的水体外形。之后选择整个水体，单击【编辑】按钮，单击【实体化】按钮，单击按钮，如图 2-210 所示。将水体实体化，这里需要注意的是实体化只能针对一个封闭的体，因此在之前合并面的时候要特别注意，否则极有可能在本次操作时报错。实体化的结果如图 2-211 所示。

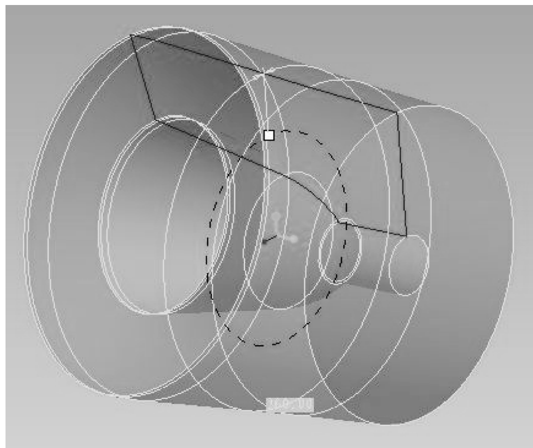


图 2-209　水体生成

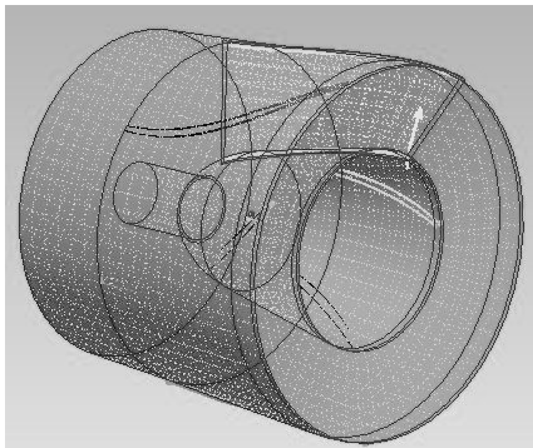


图 2-210　合并导叶叶片与水体

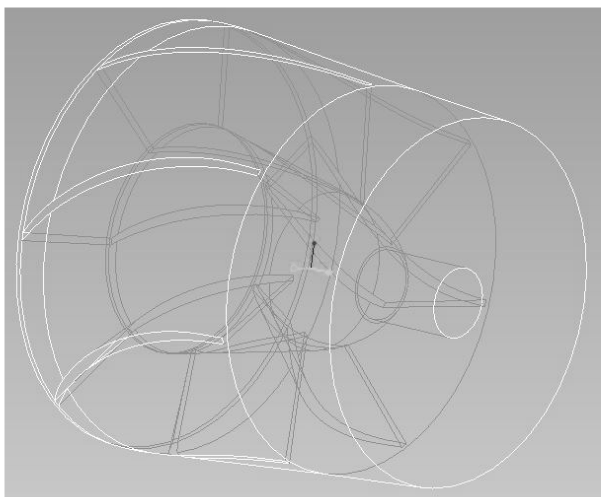


图 2-211　实体化

（12）倒圆角

导叶的进出口有着尖角，这会影响到后面的网格划分，因此要将其倒圆角。单击一条棱边，再单击[图标]【倒圆角】按钮，会出现图 2-212 所示的倒圆角操作界面。



图 2-212　倒圆角命令

选择第一种类型，数值选为 1.5（该值应根据实际情况确定），单击[图标]按钮，结束操作。依次将所有尖角导圆，结果如图 2-213。最终的空间导叶水体生成结果如图 2-214 所示。

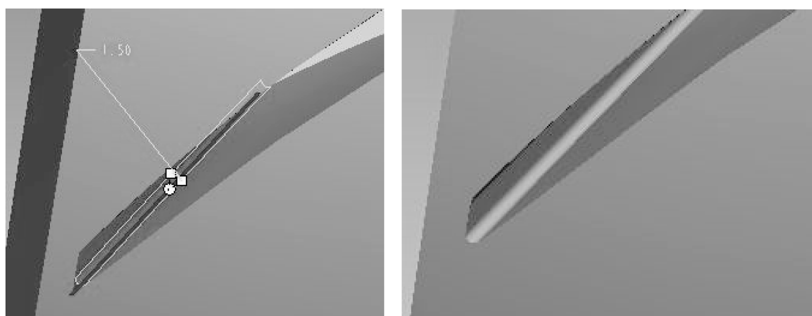


图 2-213　圆角生成

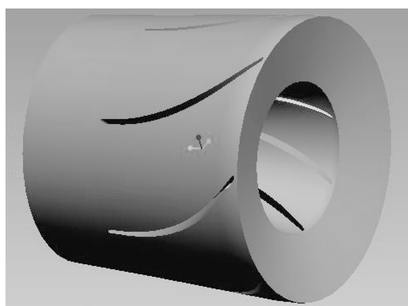


图 2-214　最终的导叶水体

第3章 叶片泵网格生成及实例

网格是模拟与分析的载体，其质量直接影响 CFD 数值计算的精度。由于叶片泵几何模型复杂、曲率变化剧烈，如何划分符合计算要求的网格遇到诸多挑战。ICEM CFD 是目前最流行的网格划分软件之一，它拥有强大的 CAD 模型修复能力、网格编辑技术、广泛的求解器支持能力以及能够进行诸如叶片泵这类复杂模型的高质量结构化网格划分能力，在叶片泵网格划分中得到了广泛的应用。本章通过实例详细介绍了 ICEM CFD 进行叶片泵非结构化网格划分、混合网格划分以及结构化网格划分的步骤。

3.1 离心泵非结构化网格划分

3.1.1 叶轮非结构化网格划分

1）创建工作目录：打开 ICEM，单击【File】→【Change Working Dir...】，如图 3-1 所示，弹出对话框，如图 3-2 所示，自定义工作目录。

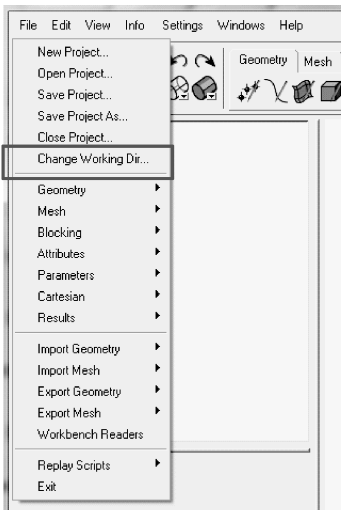


图 3-1 自定义工作目录



图 3-2 设置工作目录

2）新建文件：单击【File】→【New Project...】，创建新的叶轮网格工程文件 impeller.prj，如图 3-3 所示。

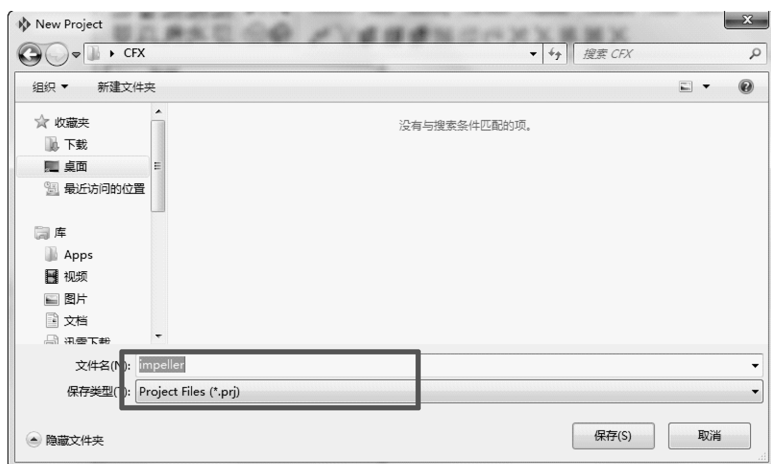


图 3-3　创建叶轮新文件

3）几何文件导入：单击【File】→【Import Geometry】→【STEP/IGES】，如图 3-4 所示，弹出如图 3-5 所示对话框，选择 *. stp 格式文件（其他几何文件格式类似）并打开，单击【OK】按钮，出现工作界面如图 3-6 所示。注意：导入文件不能放在桌面及以中文命名的目录下。

4）删除其他几何体：选中其他几何体（保留叶轮部分）并单击鼠标右键，选择【Delete】命令，如图 3-7 所示。显示【Geometry】的【Surface】及【Solid Simple Display】后的叶轮如图 3-8 所示。

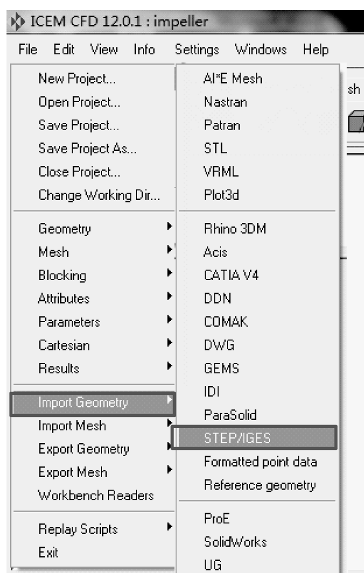


图 3-4　导入 stp 文件

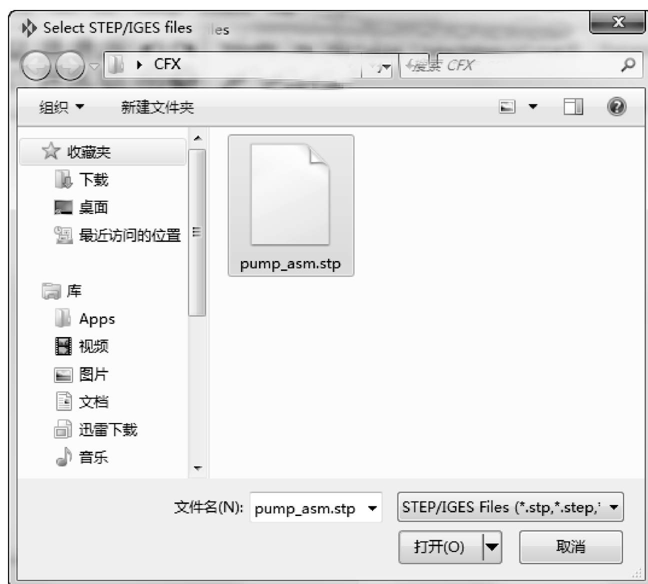


图 3-5　选择文件

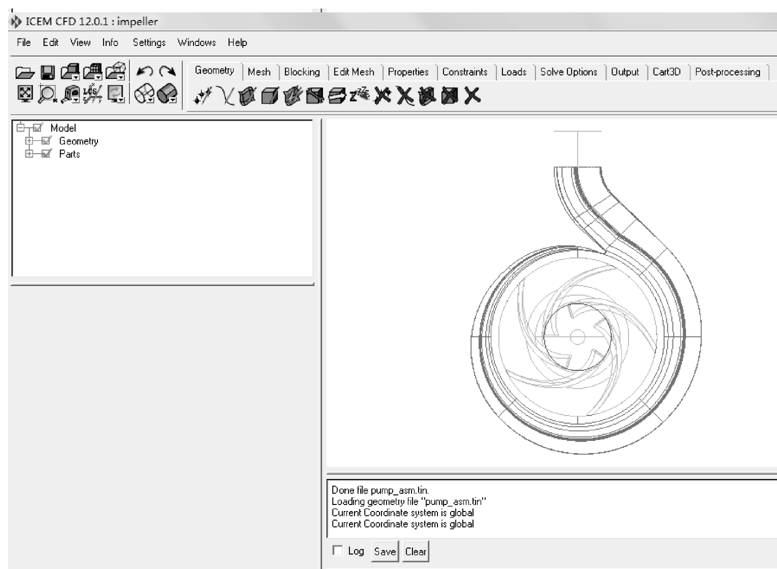


图 3-6　导入模型后工作界面

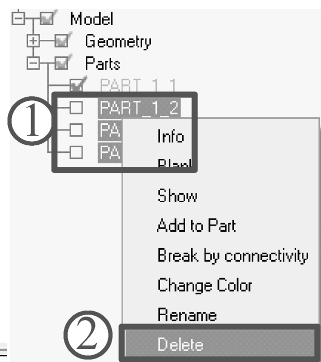


图 3-7　删除几何体

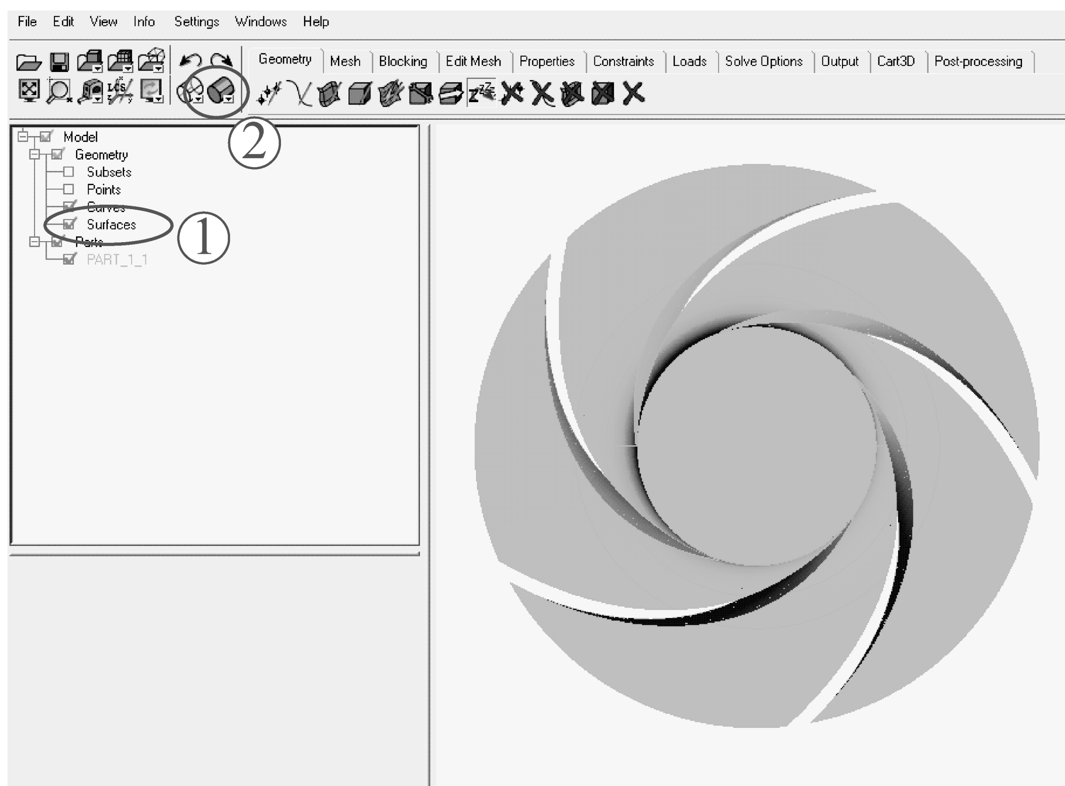


图 3-8　叶轮工作界面

5）创建叶轮几何拓扑结构：单击【Repair Geometry】，然后单击出现在界面中【Build Diagnostic Toplogy】，单击【OK】按钮，完成几何拓扑的自动创建，如图 3-9 所示。

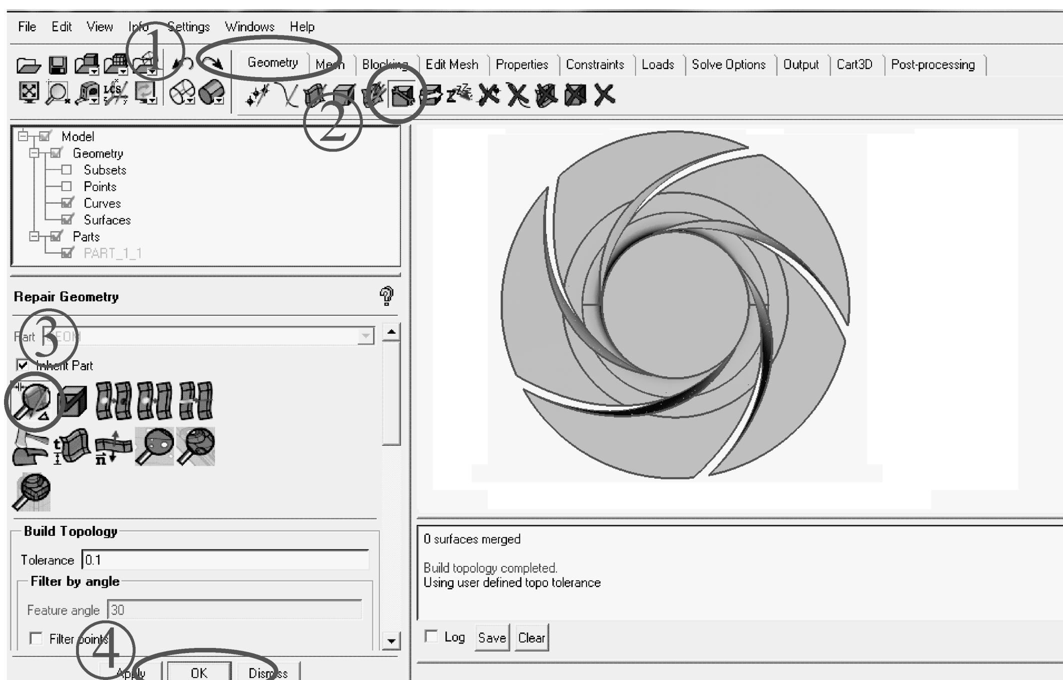


图 3-9　创建叶轮几何拓扑结构

6）创建叶轮体：单击【Create Body】，在弹出的界面中输入所要创建的叶轮体名称为 impeller，接着单击【By Topogly】，最后单击【Apply】按钮，进行叶轮体的创建，创建过程及结果如图 3-10 所示。

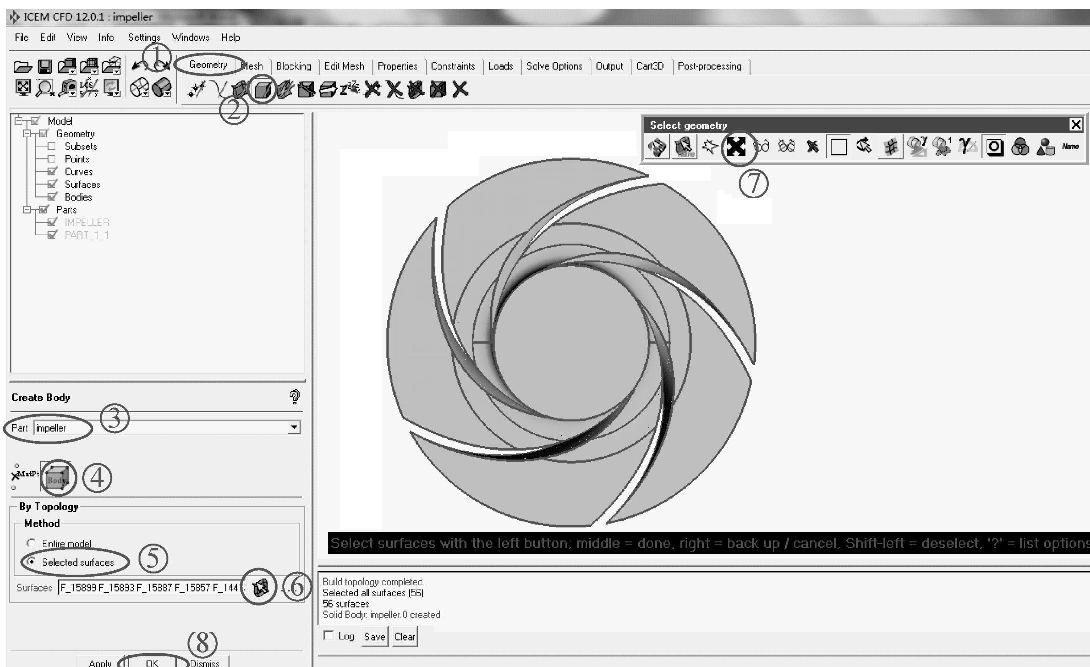


图 3-10　创建叶轮体

7）定义面：右键单击【Parts】，选择【Create Part】命令，如图 3-11 所示。

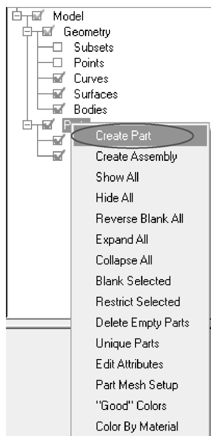


图 3-11　创建 Part

对于叶轮而言，此部分主要是创建交界面和壁面。叶轮的交界面共有两个，一个是与进口延长段相交的面（命名为 imp_jkyc），另一个与蜗壳相交的面（命名为 imp_vol）；壁面分别为前盖面（命名为 wall_imp_qiangb）、后盖板（命名为 wall_imp_hougb）以及叶片（命名为 wall_yepian）。

下面以定义叶轮与进口延长段交界面为例，说明 ICEM 定义面的方法。选择【Create Part】后，在界面 Part 中输入叶轮与进口延长段交界面名字 imp_jkyc，单击 ，选中进口面，单击【Apply】按钮（或单击鼠标中键），创建过程及结果分别如图 3-12 和图 3-13 所示。

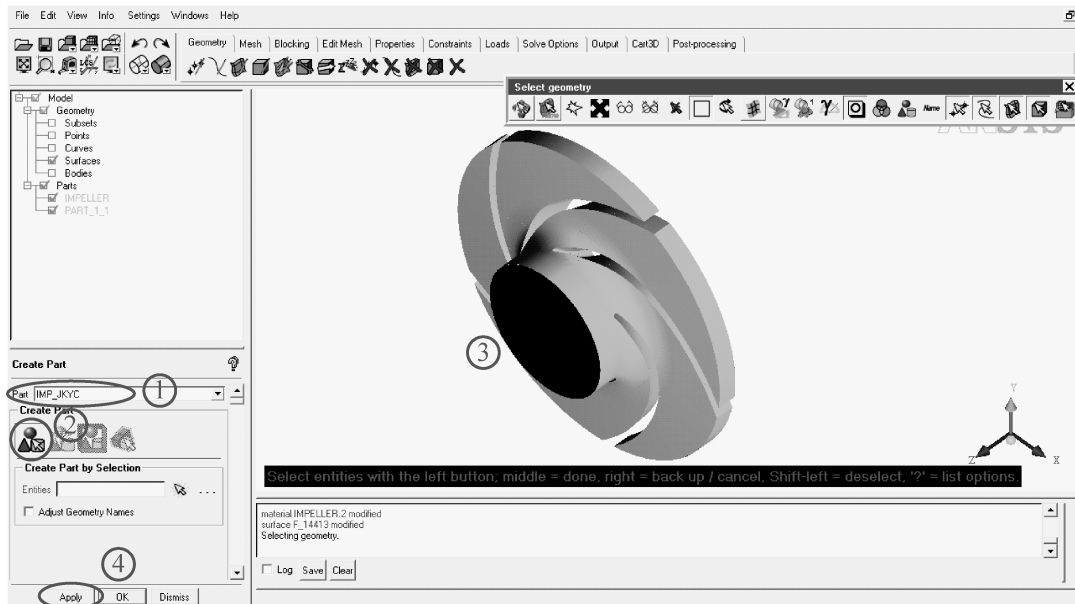


图 3-12　创建叶轮与进口延长段交界面 imp_ jkyc 过程

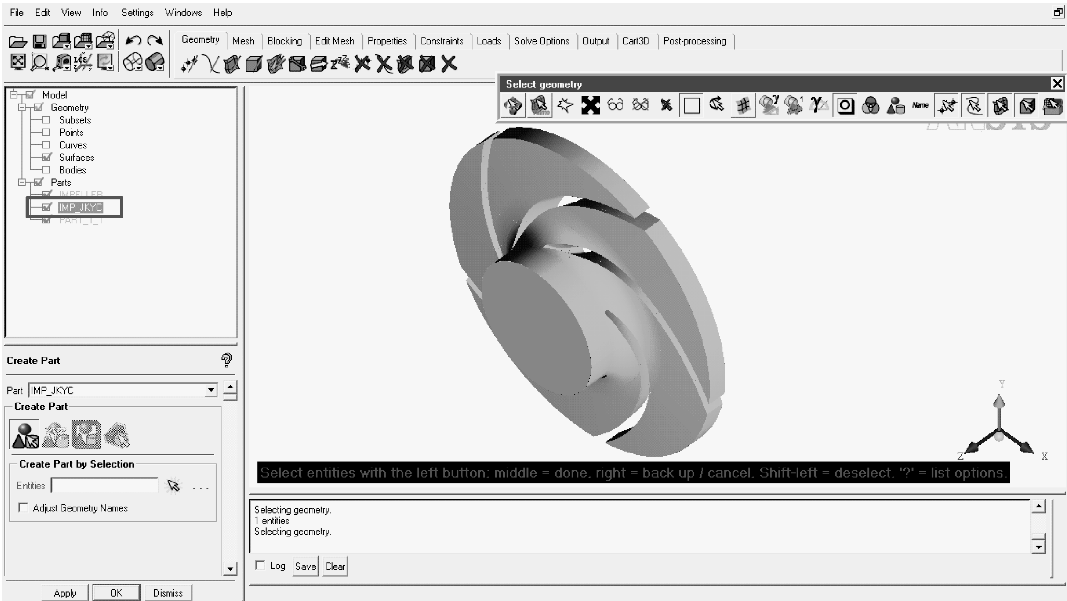


图 3-13　创建交界面结果

采用同样的方式定义叶轮与蜗壳相交的面，命名为 imp_vol，如需要将模型旋转，可以通过单击按钮并按住鼠标左键拖动来实现，按按钮恢复选取交界面状态，创建过程如图 3-14 所示。

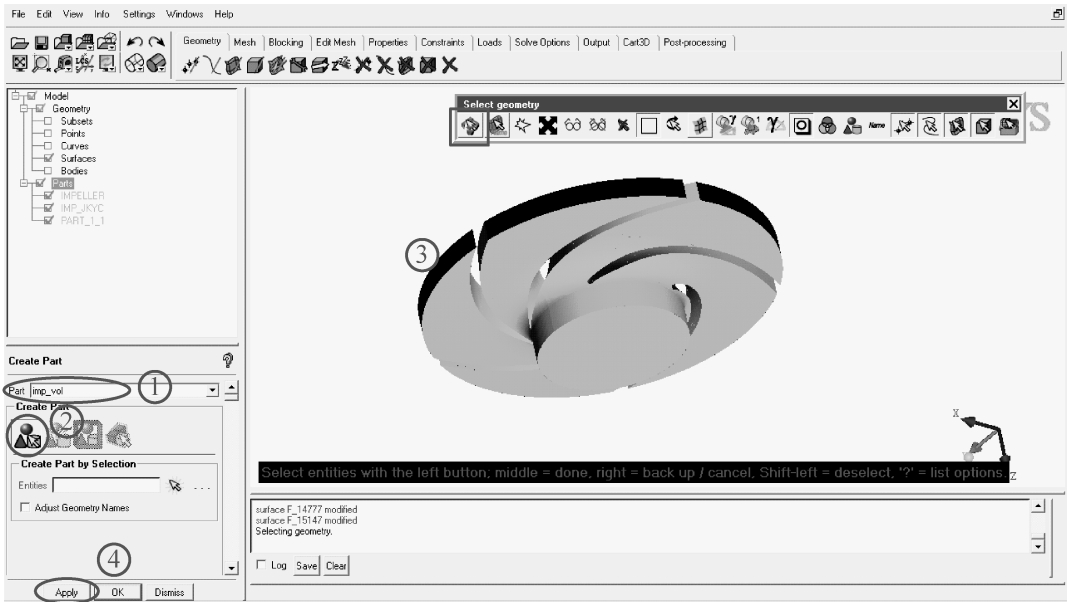


图 3-14　创建叶轮与蜗壳交界面 imp_vol 过程

前盖板壁面、后盖板壁面以及叶片壁面，分别命名为 wall_imp_qiangb，wall_imp_hougb 以及 wall_yepian（包括叶片进口圆弧面），创建过程如图 3-15 ~ 图 3-17 所示。

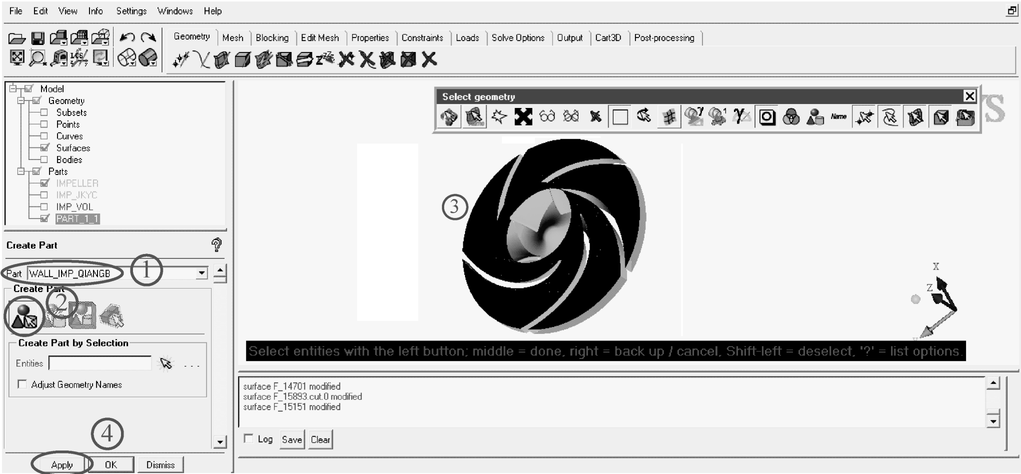


图 3-15　创建前盖板壁面

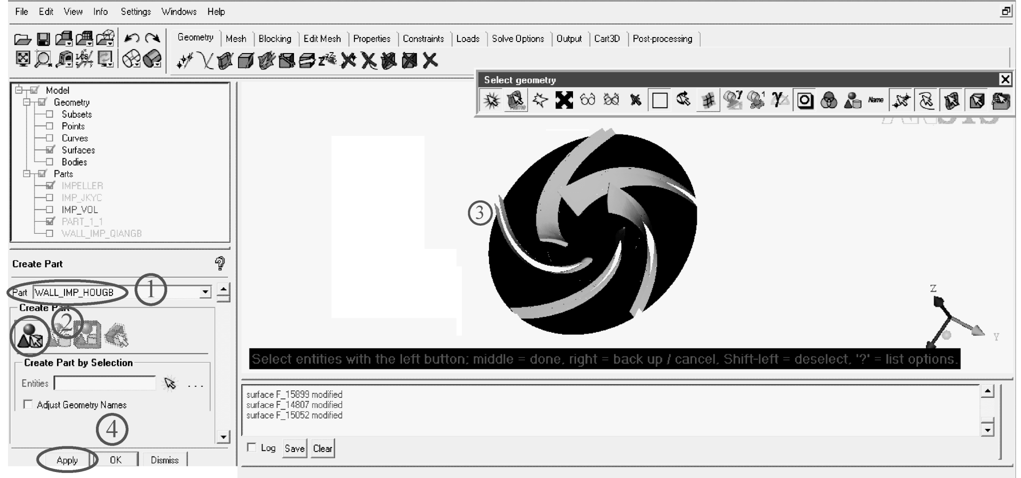


图 3-16　创建后盖板壁面

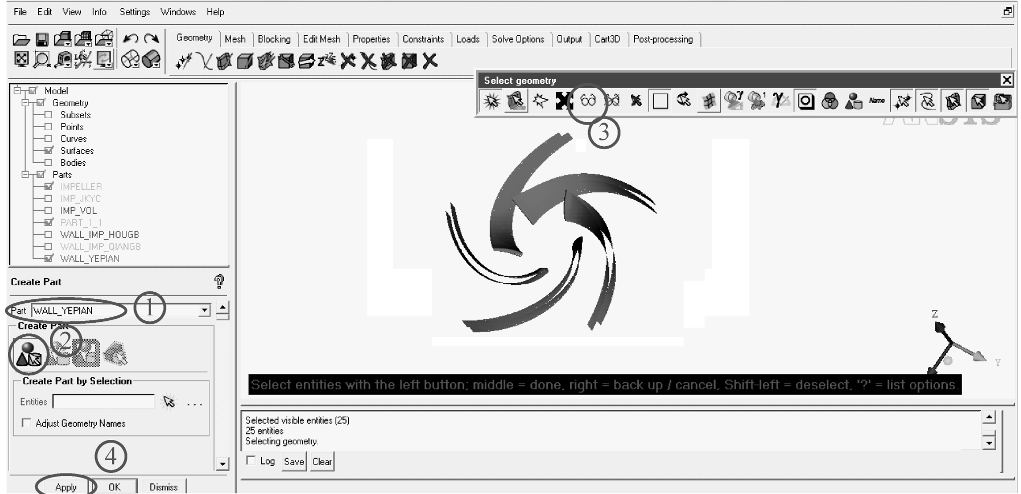


图 3-17　创建叶片壁面

叶轮面创建结果如图 3-18 所示。

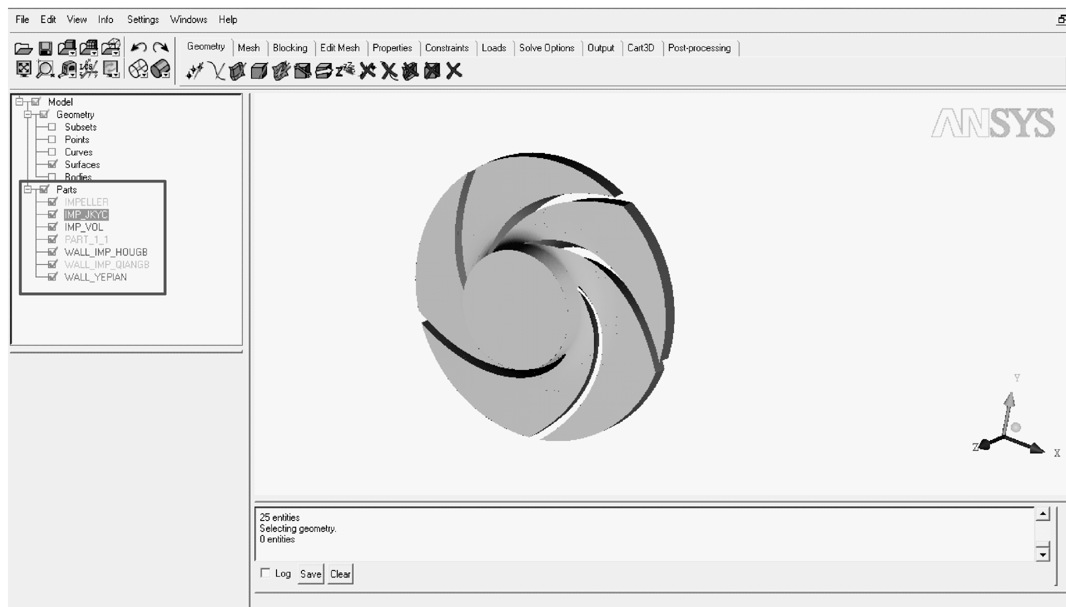


图 3-18　叶轮面创建图

8）网格划分尺寸赋值：单击【Mesh】标签，选择【Global Mesh Setup】，在左侧选项栏中的【Max element】选项栏输入 2.5（此数值控制网格疏密，数值越小网格数越多，建议先设定大的数字，再设定小数字，防止网格数过多造成电脑内存不足），单击【Apply】按钮，完成网格划分尺寸赋值，设定网格划分尺寸过程如图 3-19 所示。

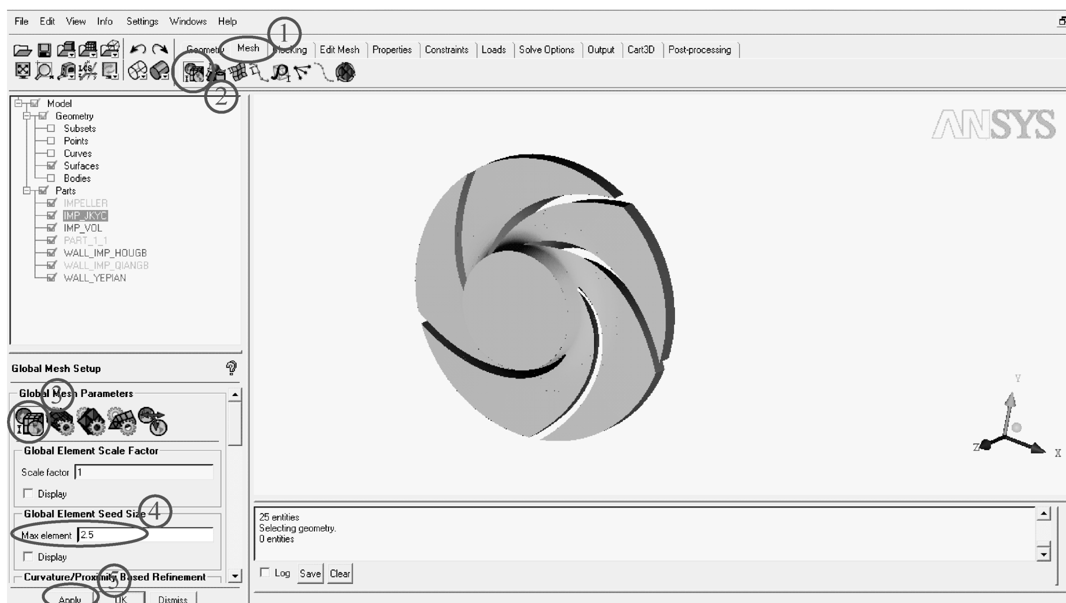


图 3-19　叶轮全局网格尺寸赋值

9）设定网格划分类型：非结构化网格类型包括四面体（Tetra/Mixed）、六面体主导（Hexa-Dominant）和笛卡尔网格（Cartesian）。本例中选择 Tetra/Mixed 网格类型，该类型网格生成方法包括：八叉树（Robust）、快速 Delunay 法和前沿推进法（Advancing Front）。本例选择八叉树法，即一种自上而下的生成网格方法，先生成体网格，再生成面网格。边评判（Edge Criterion）通常接受默认值 0.2。网格划分类型设置过程如图 3-20 所示。读者可以自行尝试其他两种方法，设置过程类似。

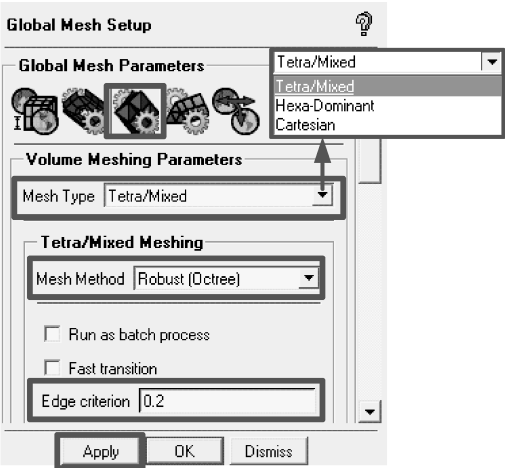


图 3-20　网格划分类型设置

10）网格生成：单击【Mesh】标签，并单击【Compute Mesh】，在左侧选项栏里，单击【Volume Mesh】，然后单击【Compute】，程序自动生成叶轮的非结构化网格。非结构化网格生成设置过程如图 3-21 所示。

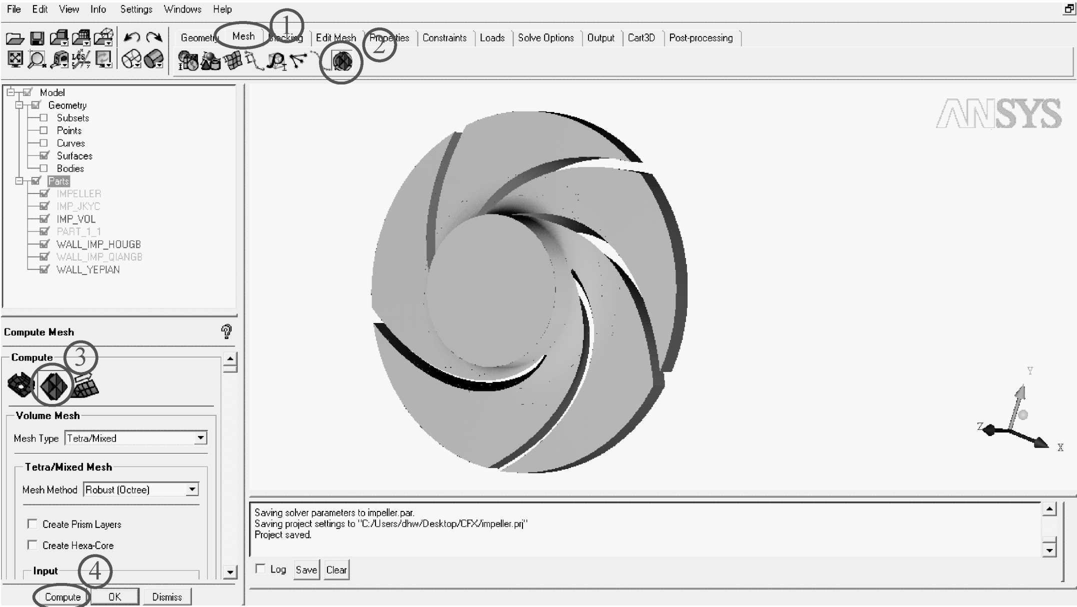


图 3-21　生成非结构化网格

11）光顺网格：上面步骤生成的网格质量一般不高，无法满足 CFD 计算的要求，可以通过光顺的方法来进一步提升网格质量，其设置过程如图 3-22 所示。单击【Edit Mesh】标签，选择【Check Mesh】，在左侧选项栏里单击【Apply】按钮，对网格进行质量检查，检查完毕后弹出对话框单击【Yes】按钮，完成非结构化网格质量检查。

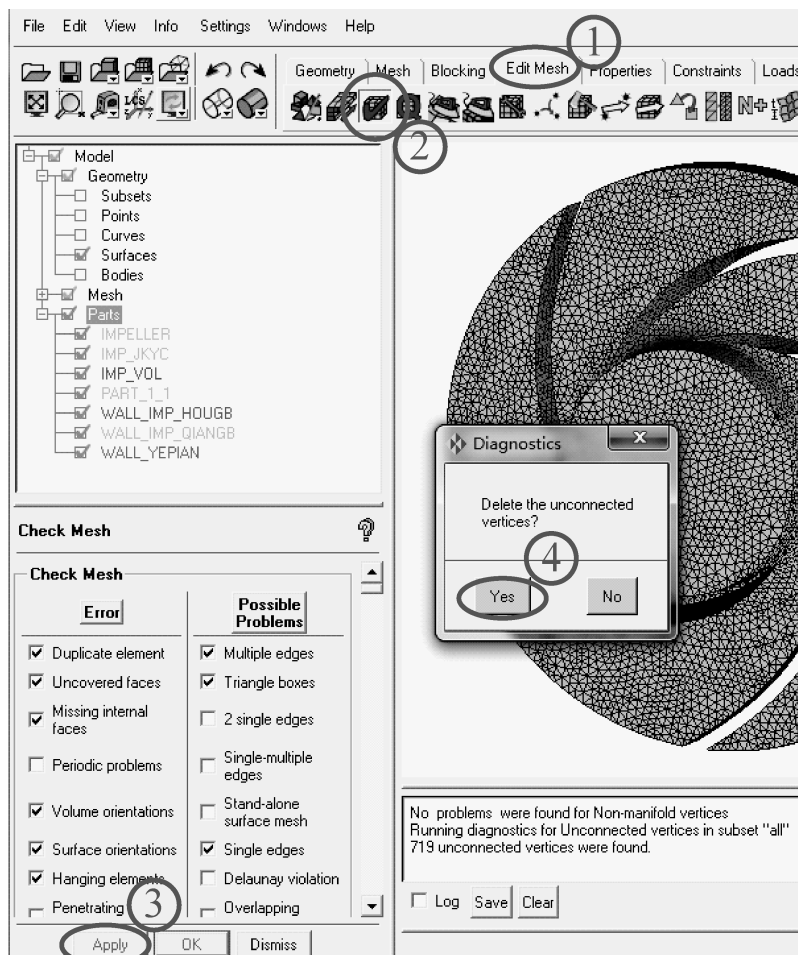


图 3-22　非结构化网格质量检查

单击【Edit Mesh】标签，选择【Smooth Mesh Globally】，在左侧选项栏里的【Criterion】中选择 Quality 光顺指标，在【Up to value】输入栏中输入 0. 2，该值取值范围为 0 ~ 1，越接近 1 网格质量越高，但需要花费的优化时间更多，一般取 0. 2，然后单击【Apply】按钮，对网格进行光顺，操作过程如图 3-23 所示。

CFD 计算不仅对非结构化网格的质量有要求（ >0. 2），而且对单元最小内角 Min angle 有要求，最低要求 >9°，一般要求 >18°。基于网格质量和优化时间考虑，此处取 14°。因此在 ICEM 进一步以 Min angle >14°为指标进行光顺，具体方法如图 3-24 所示。

12）导出计算网格文件：单击【Output】标签，选择【Select Solver】，在选项【Output Solver】中选中 ANSYS CFX（不同的求解器需要不同的输出格式，可以在下拉菜单中进行选择），在选项【Common Structural Solver】中选中 ANSYS，然后单击【Apply】按钮，具体过

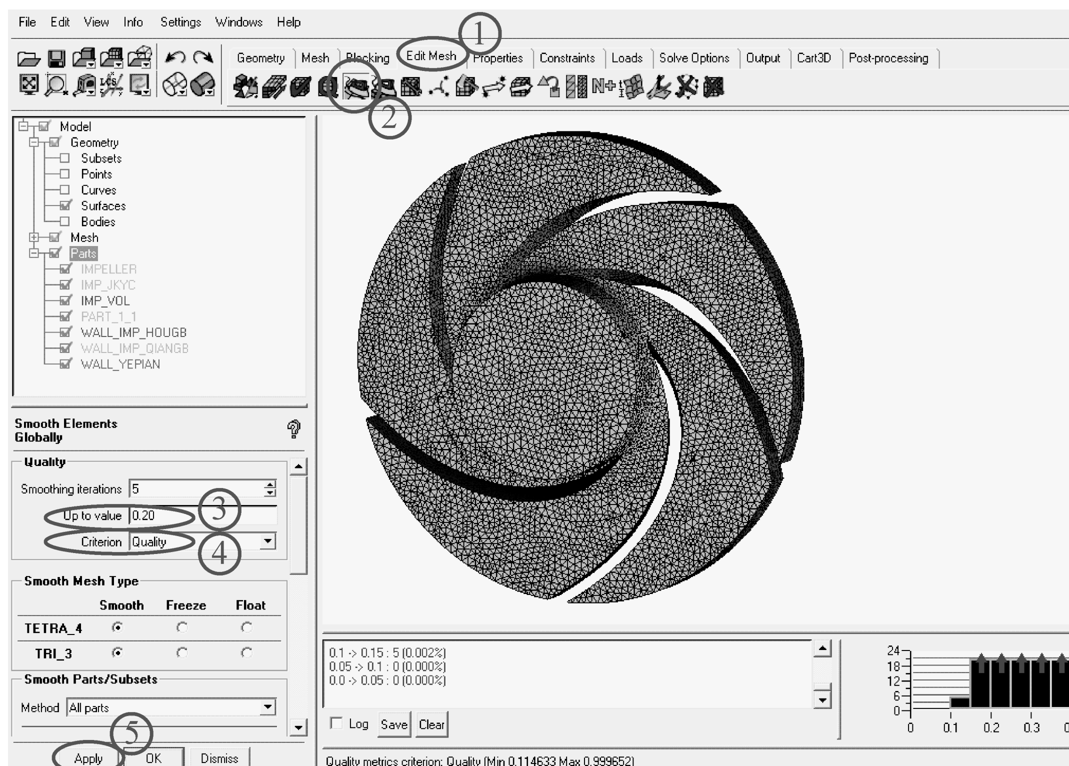


图 3-23　叶轮网格光顺——质量标准

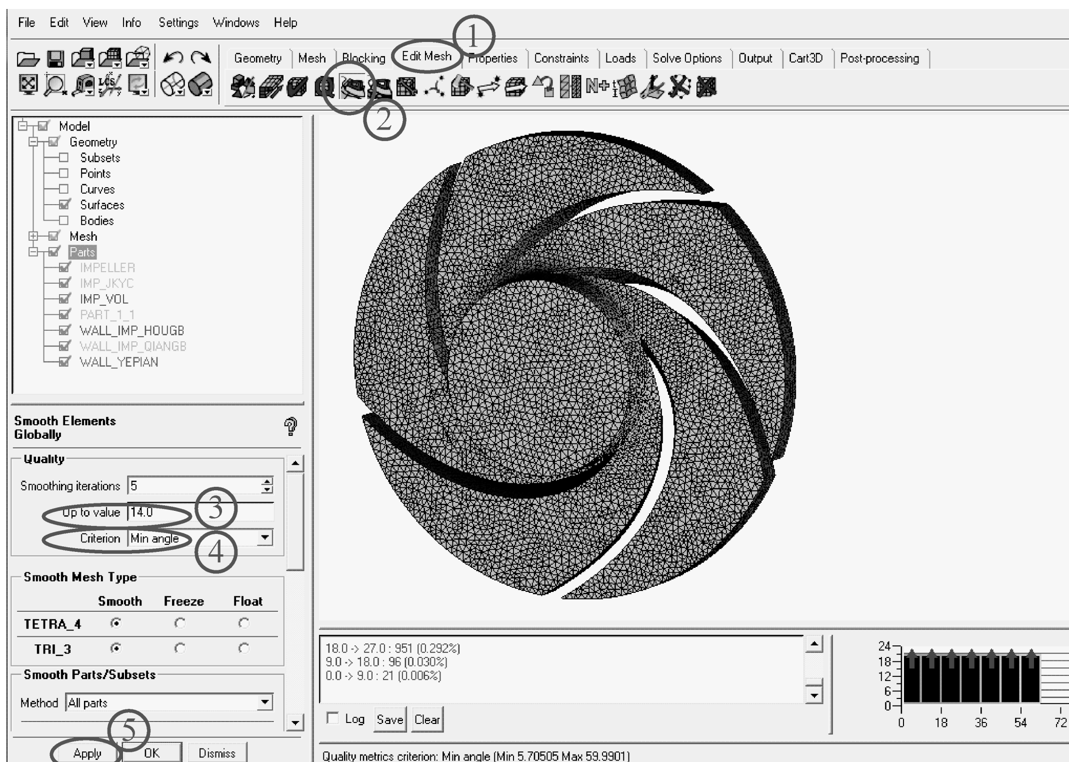


图 3-24　叶轮非结构化网格光顺——最小角度标准

程如图 3-25 所示。然后单击【Output】→【Write input】，弹出如图 3-26 所示的对话框，修改导出计算网格文件的名称及储存位置，单击【Done】按钮，导出 CFX 计算所需的 *.cfx5 网格文件。

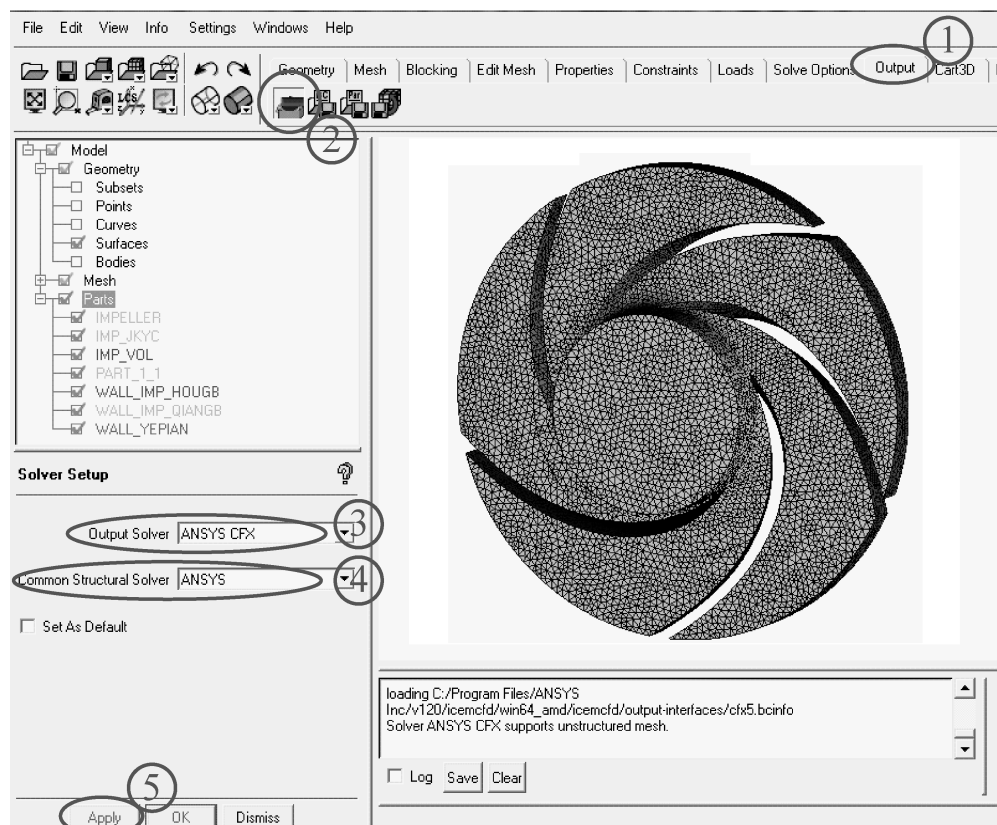


图 3-25　定义求解器

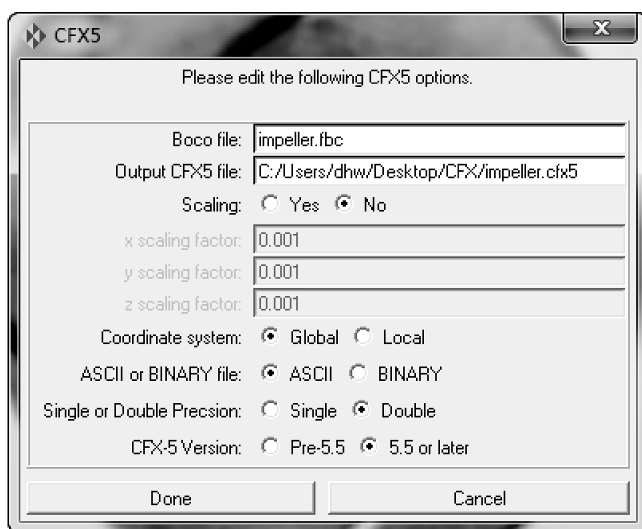


图 3-26　导出计算网格文件

3.1.2　蜗壳非结构化网格生成

与叶轮相似，蜗壳的非结构化网格划分过程如下：

1）创建工作目录。

2）新建文件：命名为 VOLUTE. prj。

3）几何文件导入。

4）删除其他几何体。

5）创建叶轮几何拓扑结构：过程如图 3-27 所示。

图 3-27　蜗壳拓扑创建

6）创建蜗壳体：体命名为 volute，创建过程及创建结果如图 3-28 所示。

图 3-28　创建蜗壳体

7）定义面：蜗壳需要创建交界面和壁面。蜗壳交界面有两个，一个是与出口延长段相交的面命名为 vol_ckyc，另一个是与叶轮相交的面命名为 vol_imp；其余所有壁面定义为 wall_volute，创建步骤与叶轮非结构化网格划分的步骤 7）相似，创建过程及结果如图 3-29 ~ 图 3-32 所示。

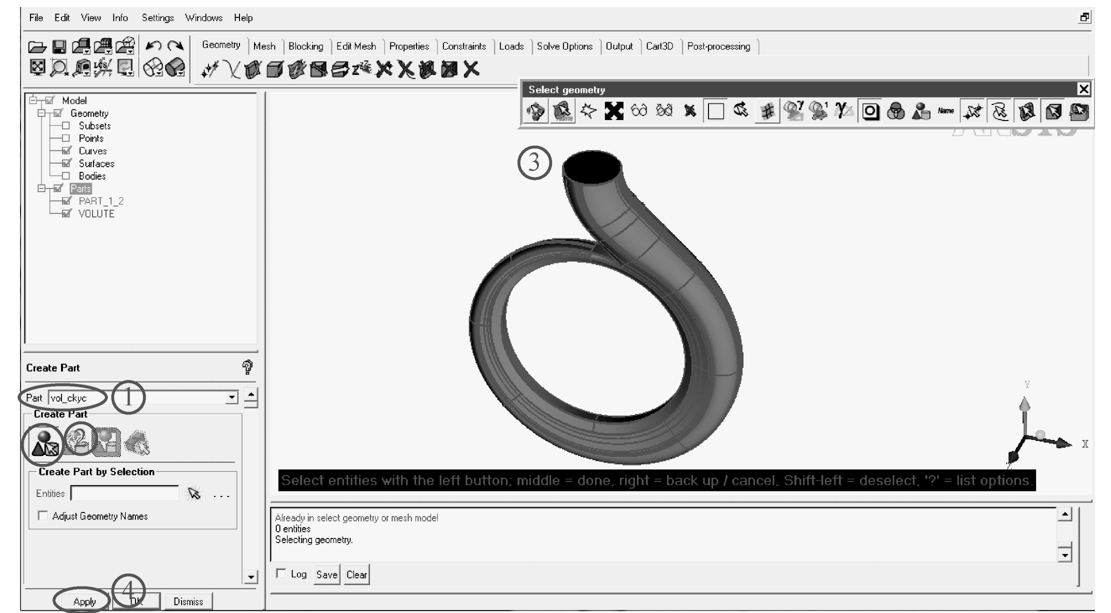


图 3-29　蜗壳与出口延长段交界面创建

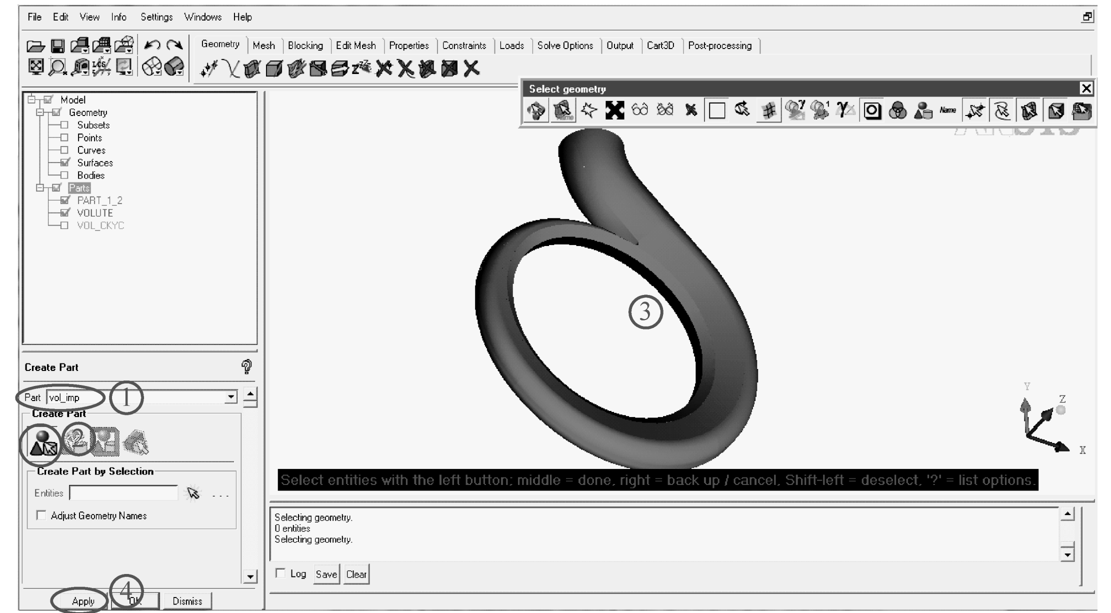


图 3-30　蜗壳与叶轮交界面创建

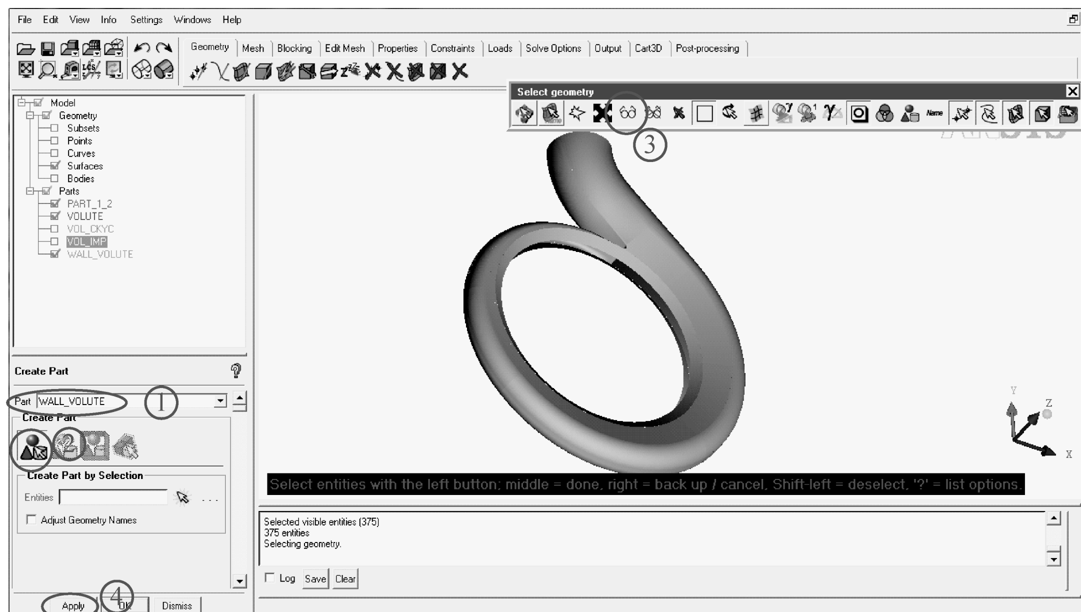


图 3-31　蜗壳壁面创建

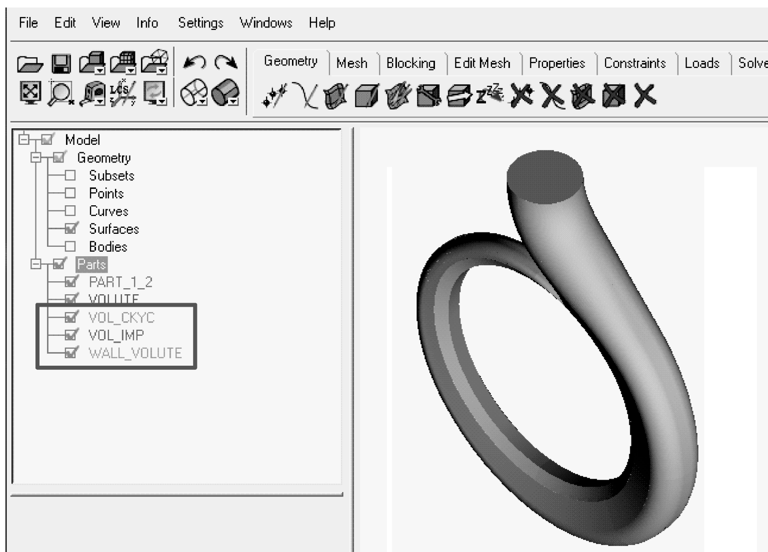


图 3-32　蜗壳创建结果

8）合并碎面：由于蜗壳碎面太多（所谓碎面是指模型中相邻比较近的型线，如果碎面过多会使得网格质量较差，甚至会导致划分失败，如图 3-33 所示），因此需要合并一些面，从而消除碎面。单击【Geometry】标签，选择【Create/Modify Surface】，弹出左下侧的选项栏，选择【Merge/Reapproximate Surfaces】，在下方图标上单击，并在右侧窗口内选中要合并的表面，单击鼠标中键或选项栏中的【Apply】按钮，具体过程如图 3-33 所示。

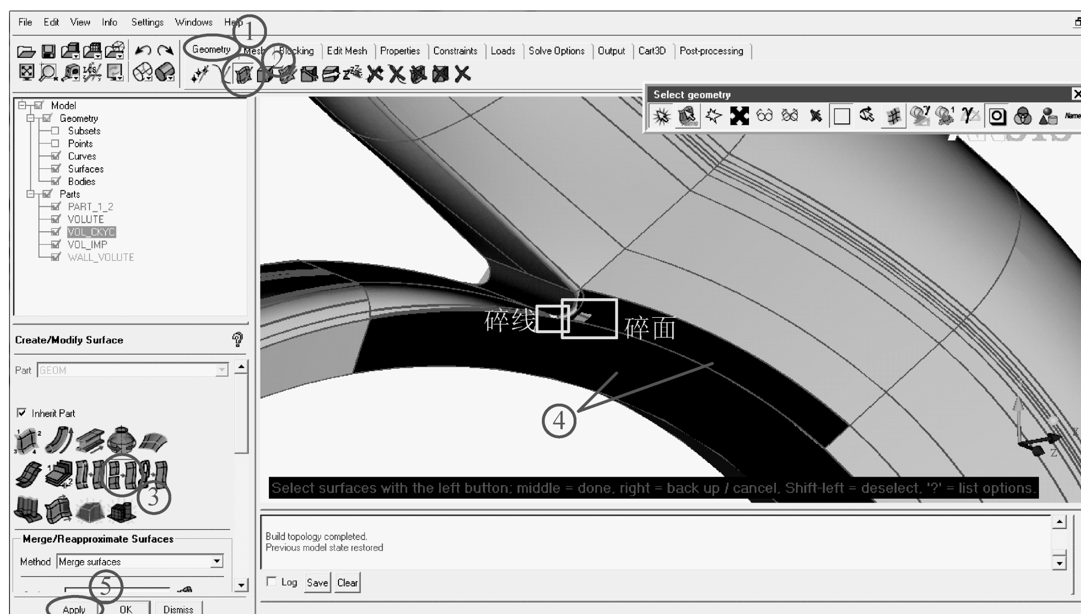


图 3-33　合并碎面

再一次创建几何拓扑如步骤 5)，得到无碎面的整体蜗壳几何，结果如图 3-34 所示。

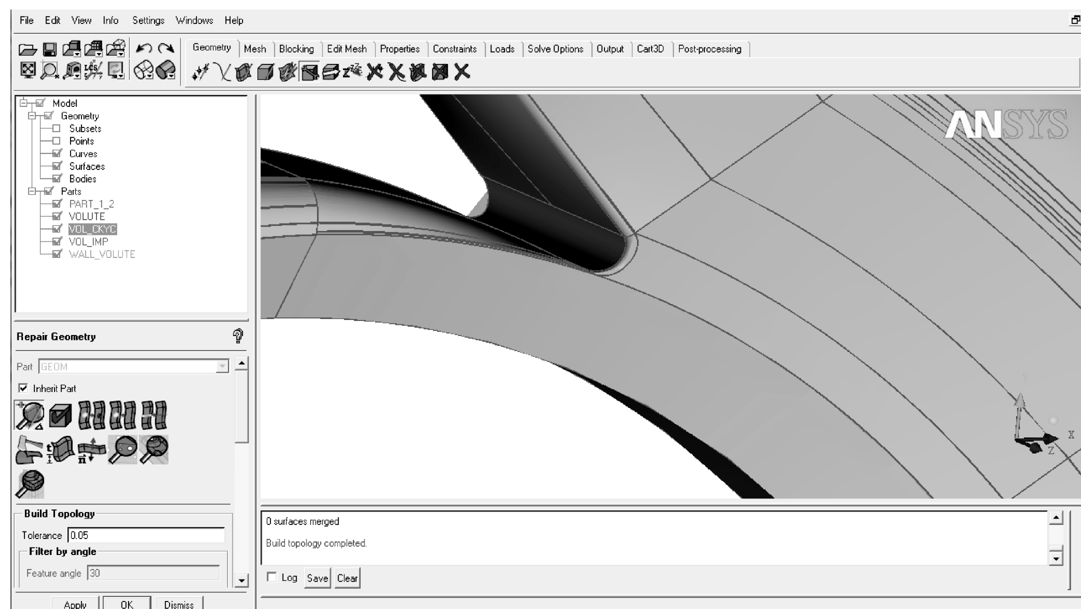


图 3-34　无碎面的蜗壳几何拓扑

9）网格划分尺寸赋值方法与叶轮一致。

10）设定网格划分类型方法与叶轮一致。

11）局部面加密，由于隔舌的曲率变化较大，此处生成的网格质量较差，因此需要对隔舌附近的网格进行加密，加密方法如图 3-35 所示。单击【Mesh】标签，选择【Surface

Mesh Setup】，弹出左下侧的选项栏，在选项【Surface】上单击，并在右侧窗口内选中蜗壳的隔舌表面，单击鼠标中键，接着在左下侧选项栏的【Maximum size】输入栏中输入 2（可根据实际需要调整），最后单击下方的【Apply】按钮完成局部面的加密。

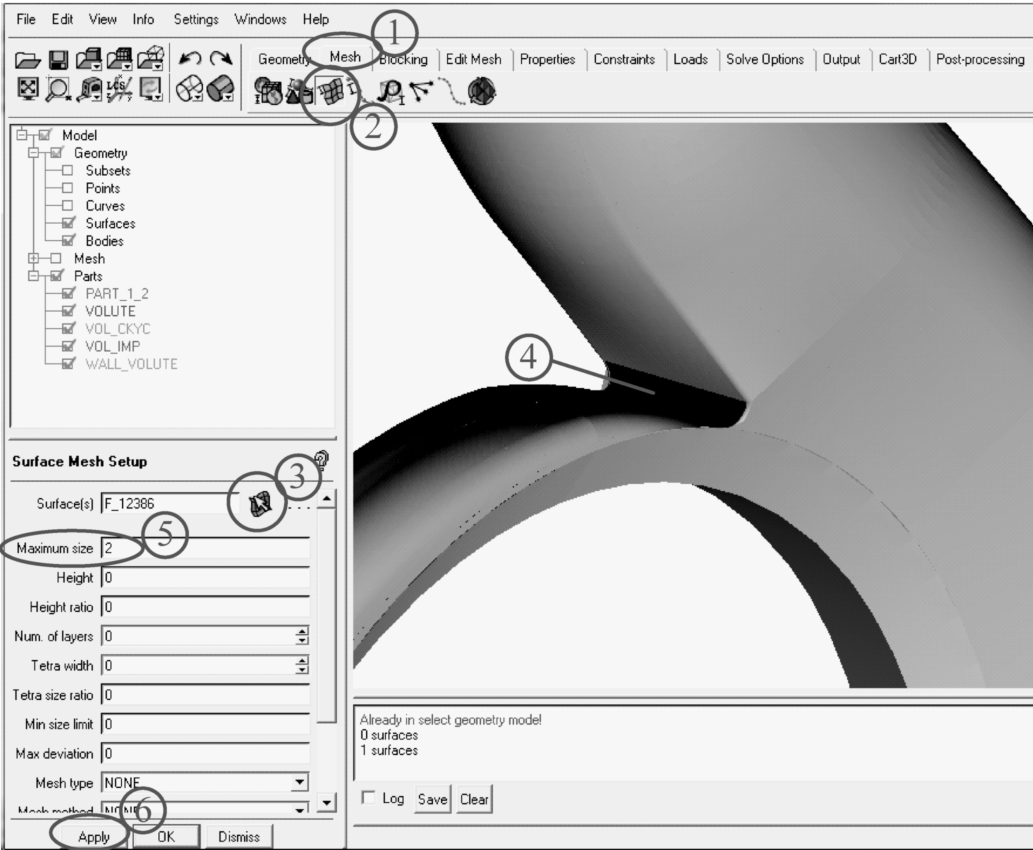


图 3-35　局部面加密

再次生成网格，得到隔舌部分局部加密的蜗壳非结构化网格，前后对比如图 3-36 所示，左图为加密前隔舌部分网格，右图为加密后隔舌部分网格。

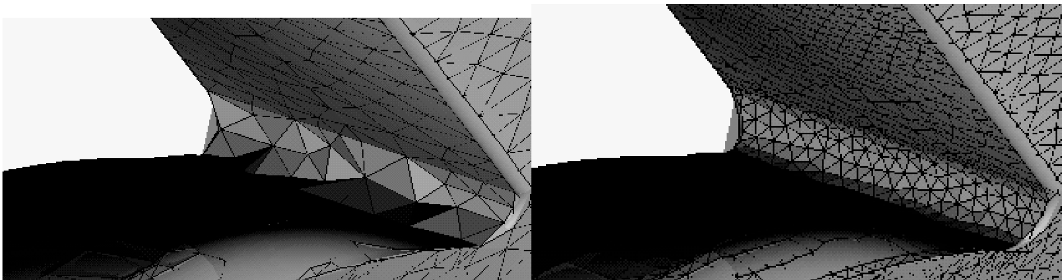


图 3-36　隔舌面加密前后非结构化网格对比图

12）网格生成。

13）光顺网格。

14）导出计算网格文件。

3.1.3 进出口延长段非结构化网格生成

与叶轮及蜗壳相似，离心泵的进出口延长段非结构化网格划分过程如下：

1）创建工作目录。

2）新建文件：分别命名为 INLET. prj 及 OUTLET. prj。

3）几何文件导入。

4）删除其他几何体。

5）创建进口延长段和出口延长段几何拓扑结构。

6）创建进口延长段和出口延长段几何体。

7）定义面：对于进口延长段需定义进口边界、进口延长段与叶轮的交界面以及进口延长段的壁面，其命名分别为 inlet，jkyc_imp，wall_jkyc。

对于出口延长段需定义出口边界、叶轮与出口延长段的交界面以及出口延长段的壁面，其命名分别为 outlet，imp_ckyc，wall_ckyc。

8）网格划分尺寸赋值。

9）设定网格划分类型。

10）网格生成。

11）光顺网格。

12）导出计算网格文件。

3.1.4 组合

各部分非结构化网格可在 CFX-Pre 中实现组合。详细步骤参见本书离心泵定常计算部分的讲解。

3.2 离心泵混合网格划分

3.2.1 叶轮混合网格划分

1）创建工作目录。

2）新建文件。

3）几何文件导入。

4）删除其他几何体。

5）创建叶轮几何拓扑结构。

6）创建叶轮体。

7）定义面。

8）网格划分尺寸赋值：以上步骤与非结构化网格划分方法一致，具体参见 3.1.1 节。

9）设定网格划分类型：ICEM 中非结构化网格类型包括四面体（Tetra/Mixed）、六面体主导（Hexa-Dominant）和笛卡尔网格（Cartesian）。本例中选择 Tetra/Mixed 网格类型，该类型网格生成方法包括：八叉树（Robust）、快速 Delunay 法和前沿推进法（Advancing

Front）。本例选择八叉树法，即一种自上而下的生成网格方法，先生成体网格，再生成面网格。边评判（Edge Criterion）是通过一个因子细分网格比设定参数能更好地捕捉几何外形，通常接受默认值 0.2。网格划分类型设置过程如图 3-37 所示。读者可以自行尝试其他两种方法，设置过程类似。

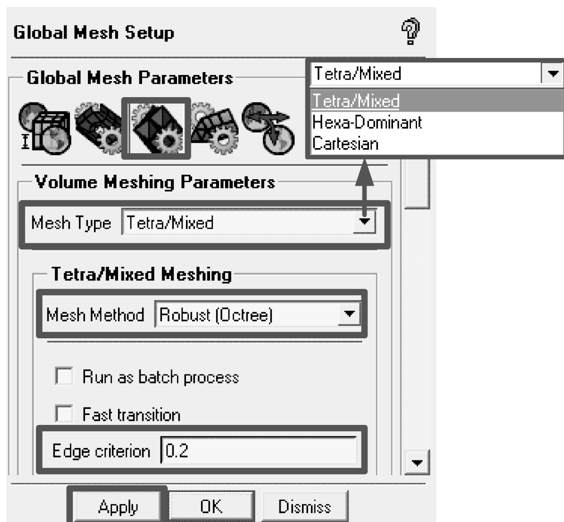


图 3-37　网格划分类型设置

10）混合网格设置：单击【Prism Meshing Parameters】按钮，在【initial height】选项栏中输入 0.05（数值表示初始网格高度），在【Height ratio】选项栏中输入 1.2（数值表示下一层三棱柱网格与上一层网格之间高度的比值），并在【Number of layers】选项栏中输入 10（数值表示网格层数），混合网格参数设置如图 3-38 所示。

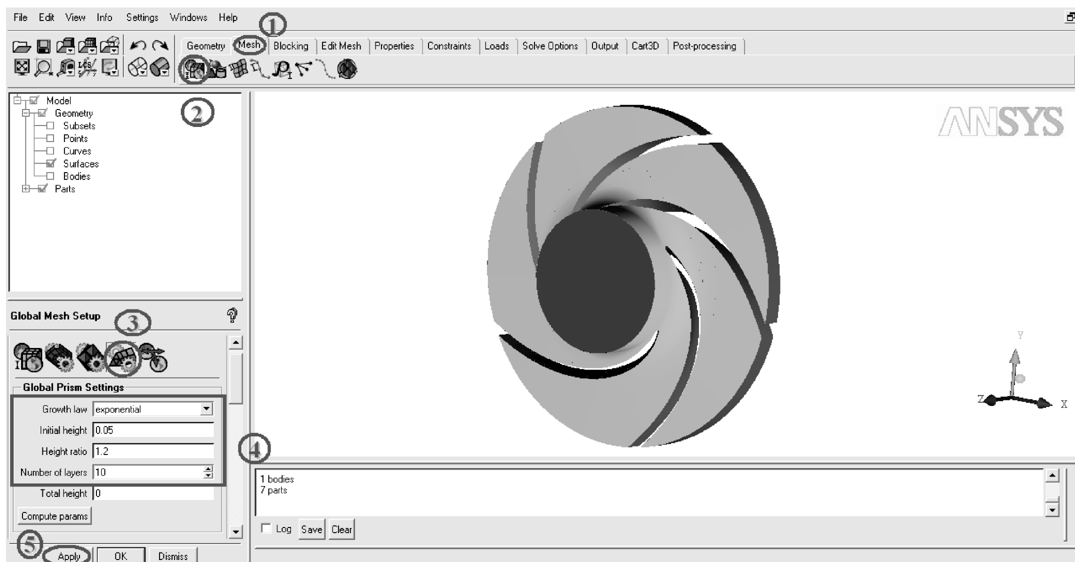


图 3-38　混合网格参数设置

单击【Mesh】标签，选择【Part Mesh Setup】，弹出如图 3-39 所示对话框，选择三棱柱网格的壁面区域，这里只勾选 wall_imp_qiangb 和 wall_imp_hougb 壁面作为边界层，忽略 wall_yepian 的边界层（若勾选 wall_yepian 在 wall_yepian 与 wall_imp_qiangb 及 wall_imp_hougb 交界处生成的网格质量将会非常低，不利于后续数值计算），混合网格边界层设置如图 3-39 所示。

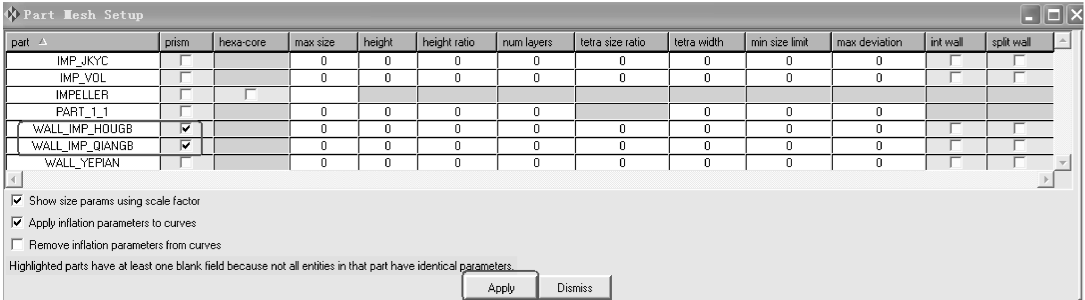


图 3-39　叶轮混合网格边界层设置

11）生成混合网格：单击【Mesh】标签，选择【Compute Mesh】，在左侧选项栏里，单击【Volume Mesh】，生成方法如图 3-40 所示。由于需要在生成的网格中含有三棱柱网格，因此要勾选【Create Prism Layers】，然后单击【Compute】按钮，生成叶轮的混合网格。叶轮混合网格生成结果如图 3-41 所示。

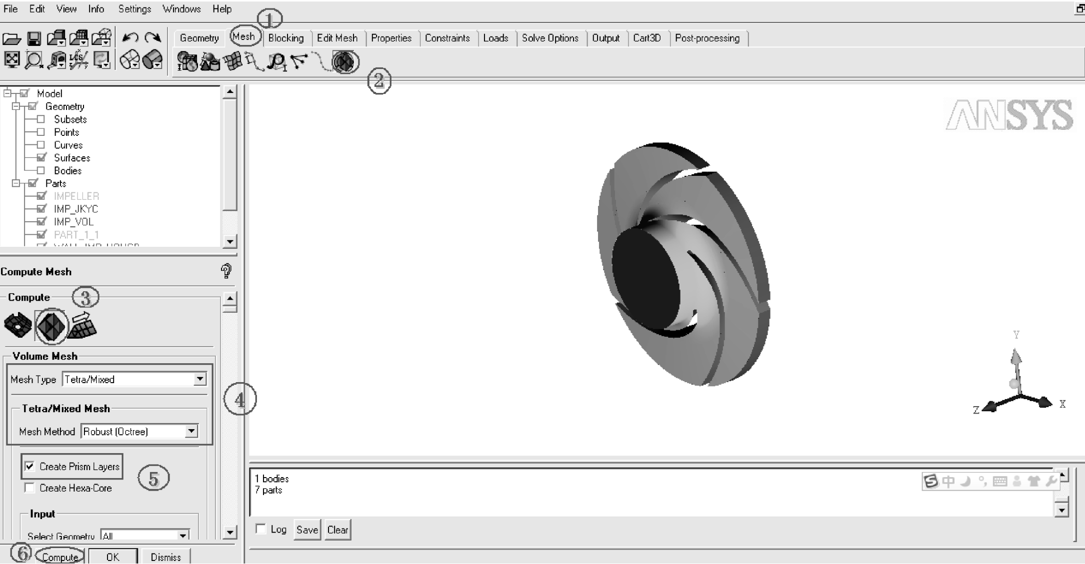


图 3-40　生成混合网格

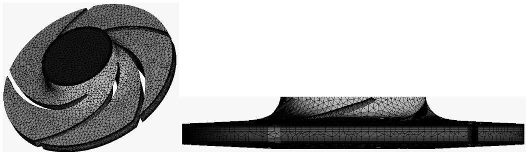


图 3-41　初始混合网格

12）光顺混合网格：生成的混合网格需要通过光顺来进一步提升网格质量，其方法如图 3-42 所示。单击【Edit Mesh】标签，选择【Check Mesh】，在左侧选项栏里单击【Apply】按钮，对网格进行质量检查，检查完毕后弹出对话框，单击对话框中的【Yes】按钮，完成混合网格的质量检查。

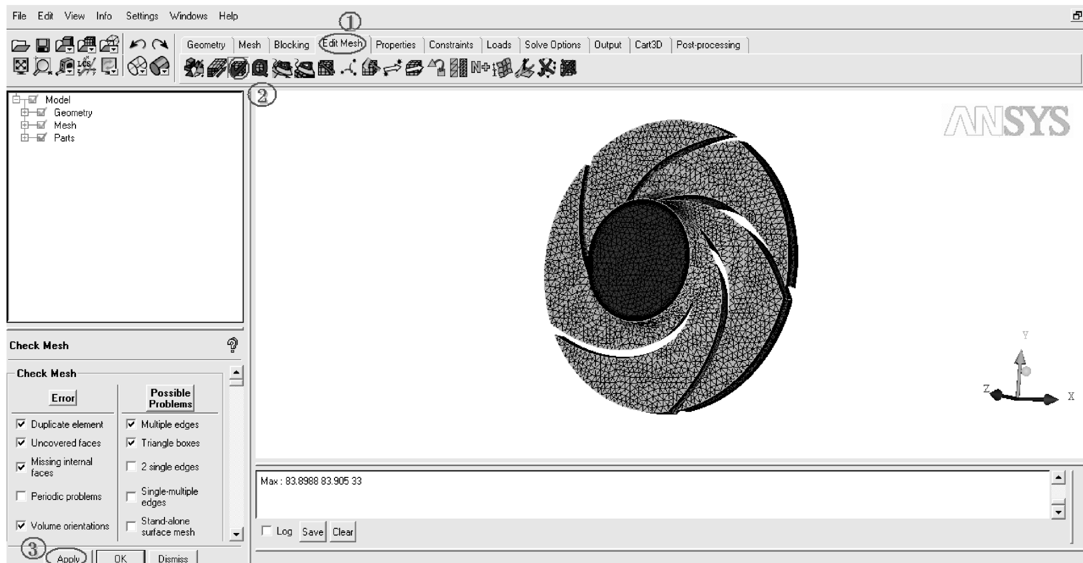


图 3-42　混合网格质量检查

单击【Edit Mesh】标签，选择【Smooth Mesh Globally】，在左侧选项栏里的【Criterion】中选择 Quality 光顺指标，在【Up to value】输入栏中输入 0.2，然后单击【Apply】按钮，对网格进行光顺，操作过程如图 3-43 所示。

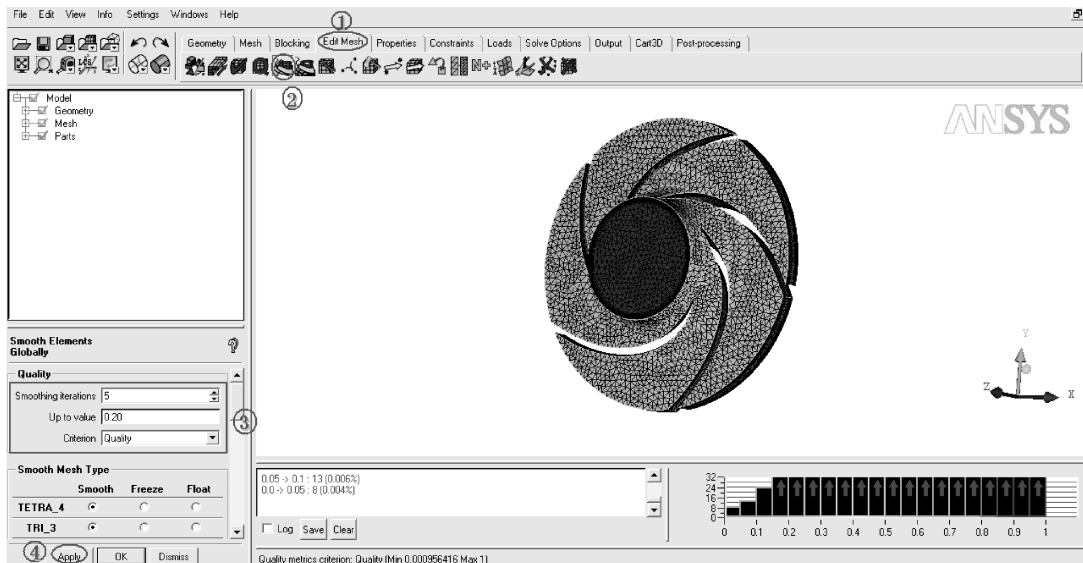


图 3-43　叶轮混合网格光顺——质量标准

CFD 计算不仅对非结构网格的 Quality 有要求（>0.2），而且对单元最小内角 Min angle 有要求（最低要求>9°，一般要求>18°），基于网格质量和优化时间考虑，本书取 18°。因此在 ICEM 进一步以 Min angle >18°为指标进行光顺，具体方法如图 3-44 所示。

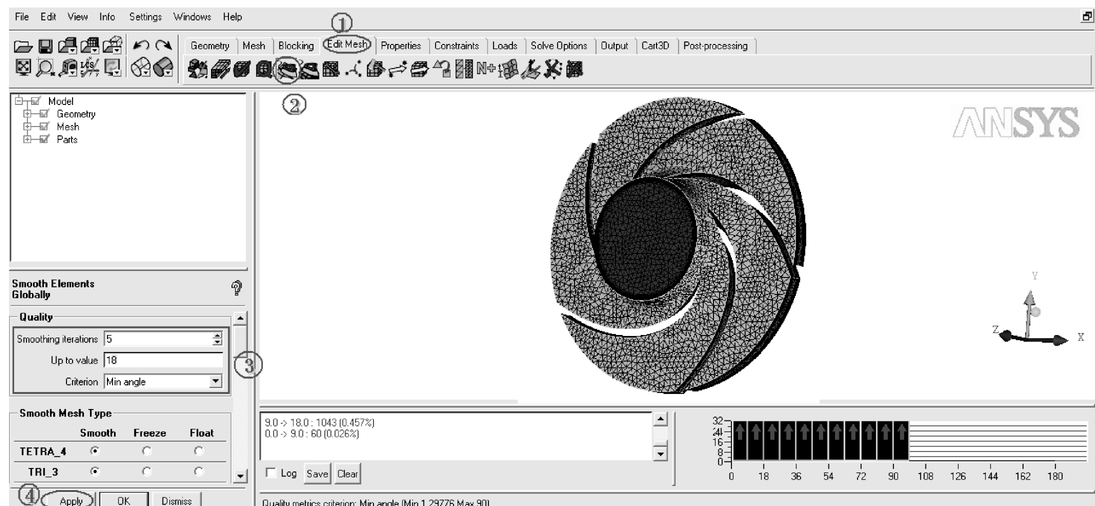


图 3-44　叶轮混合网格光顺——最小角度标准

13）导出计算网格文件：单击【Output】标签，选择【Select Solver】，弹出左下侧的选项栏，在选项【Output Solver】中选中 ANSYS CFX（不同的求解器需要不同的输出格式，可以在下拉菜单中进行选择），在选项【Common Structural Solver】中选中 ANSYS，然后单击【Apply】按钮，具体过程如图 3-45 所示。然后单击【Output】→【Write input】，弹出如图 3-46 所示的对话框，修改导出计算网格文件的名称及储存位置，单击【Done】按钮，导出 CFX 计算所需的 *. cfx5 网格文件。

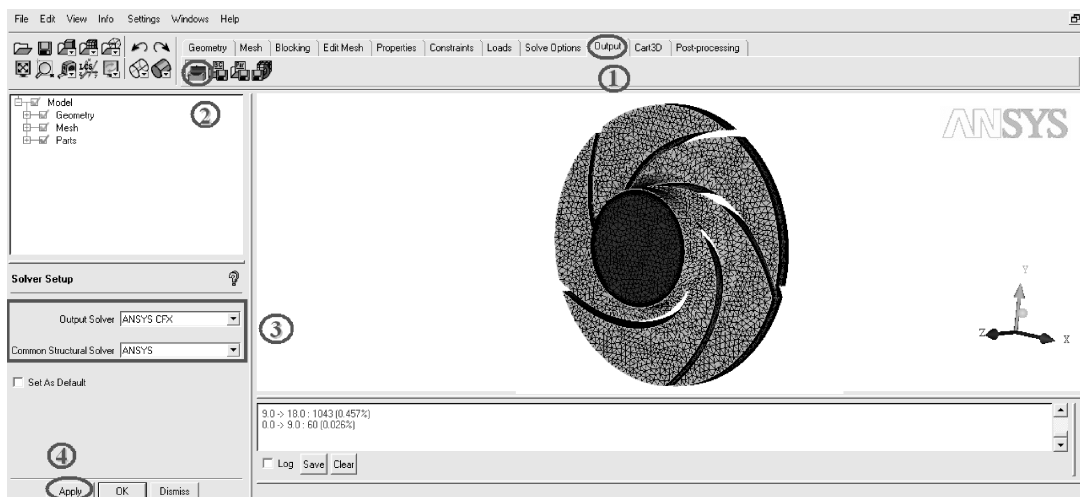


图 3-45　定义求解器

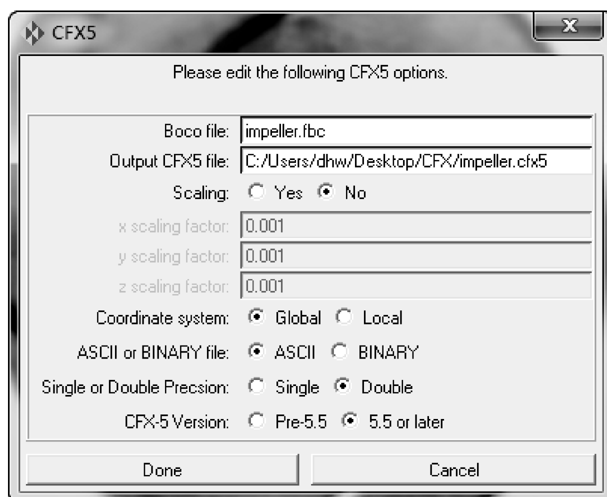


图 3-46　导出计算网格文件

3.2.2　蜗壳混合网格生成

与叶轮相似，蜗壳的混合网格划分过程如下：

1）打开 ICEM，创建工作目录。

2）导入 stp 格式的几何文件。

3）保留蜗壳几何体，蜗壳工作界面如图 3-47 所示。

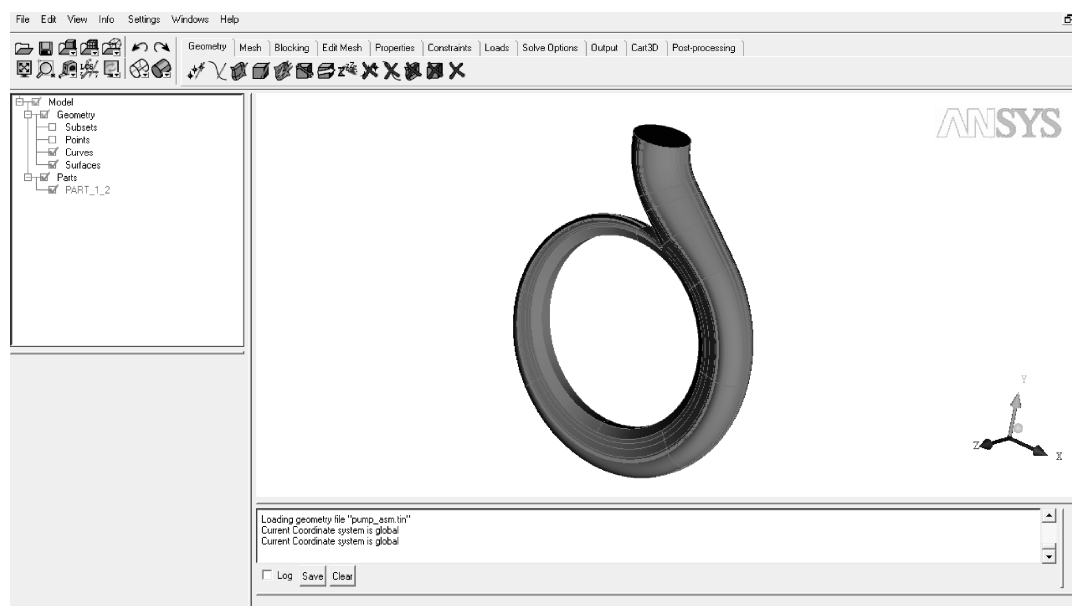


图 3-47　蜗壳工作界面

4）自动创建几何拓扑，如图 3-48 所示。

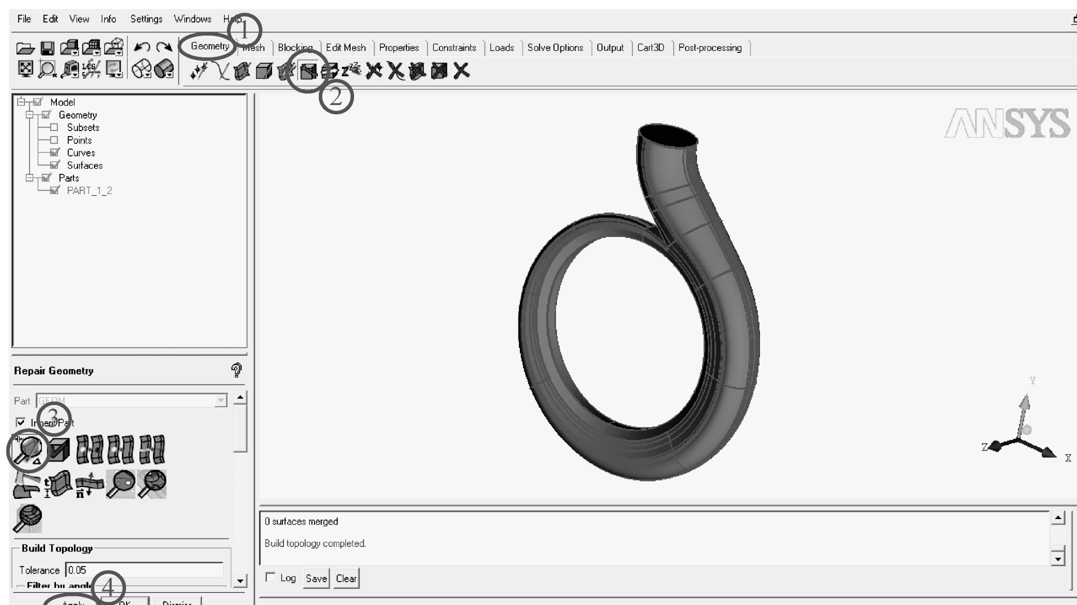


图 3-48　蜗壳拓扑创建

5）创建体，体命名为 volute，创建过程及创建结果如图 3-49 所示。

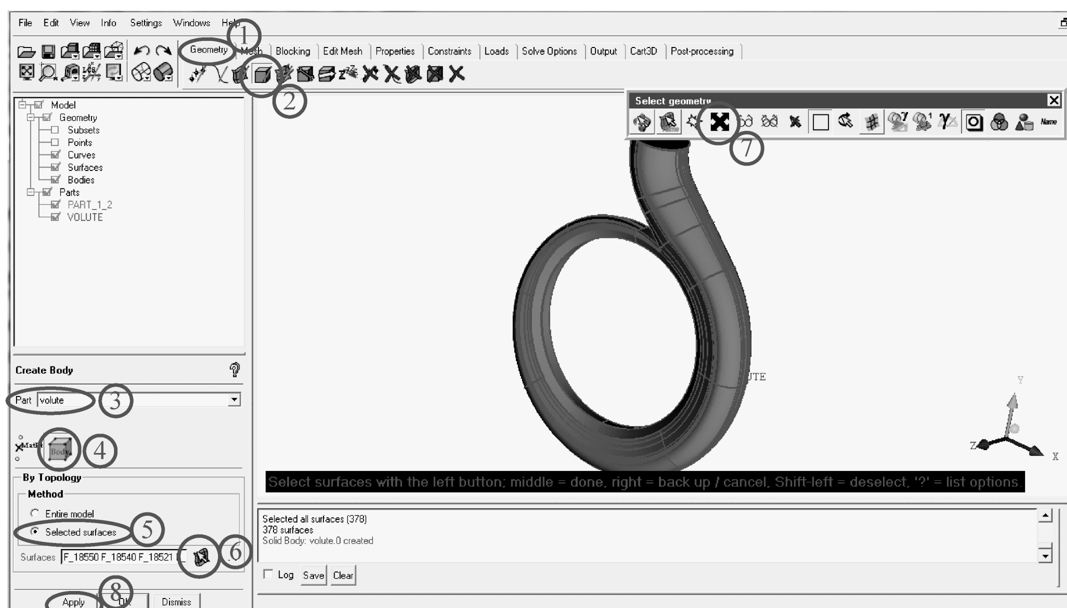


图 3-49　创建蜗壳体

6）创建 Part，蜗壳需要创建交界面和壁面。蜗壳交界面有两个，一个是与出口延长段相交的面命名为 vol_ckyc，另一个是与叶轮相交的面命名为 vol_imp；所有壁面定义为 wall_volute，创建步骤同叶轮非结构化网格划分步骤 7)，创建过程及结果如图 3-50 ~ 图 3-53 所示。

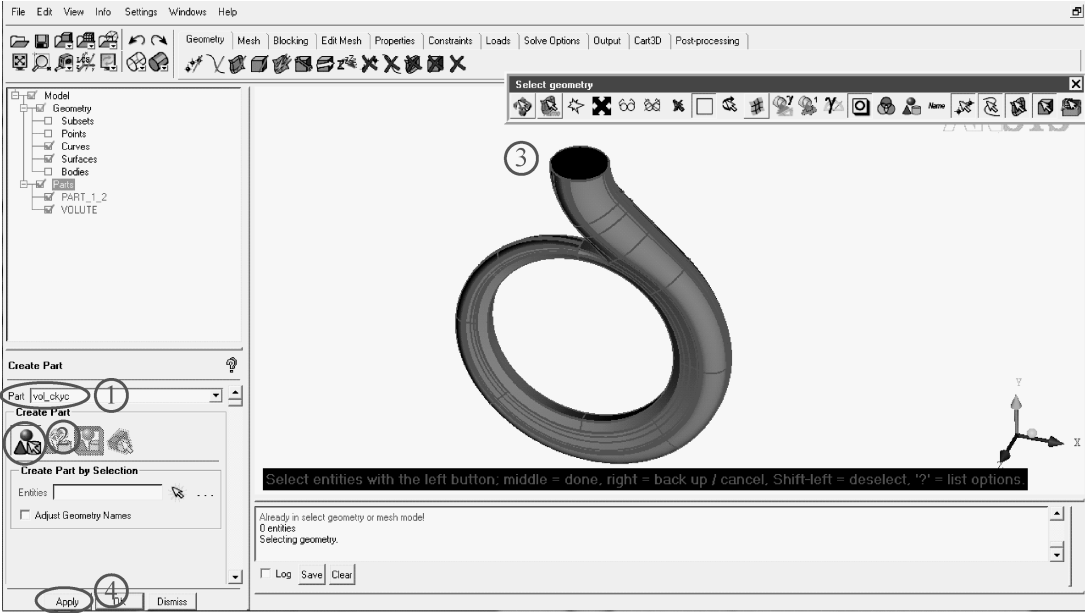


图 3-50　蜗壳与出口延长段交界面 part 创建图

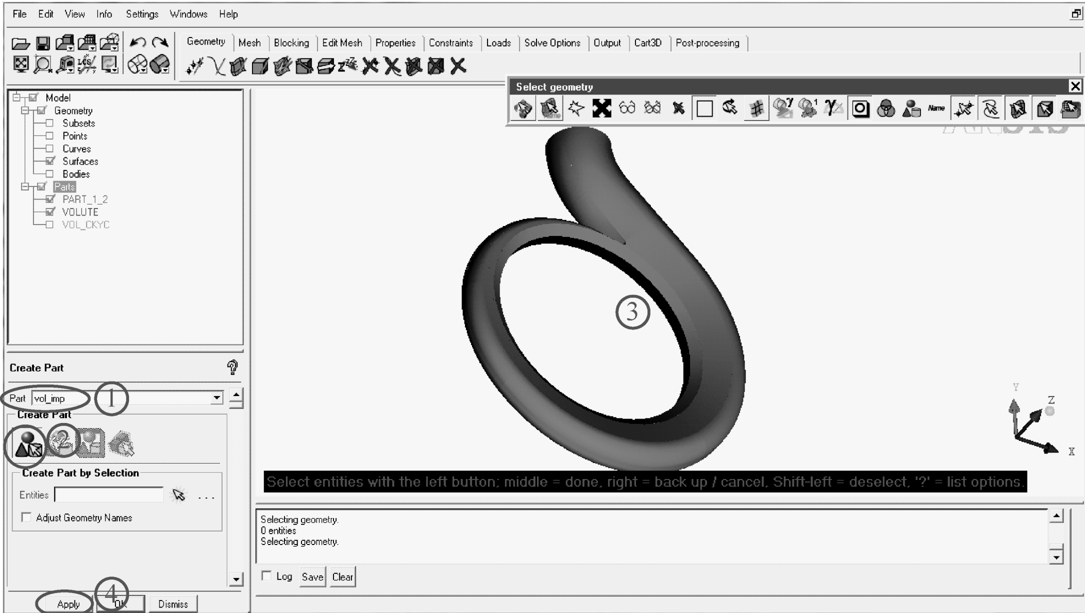


图 3-51　蜗壳与叶轮交界面 part 创建图

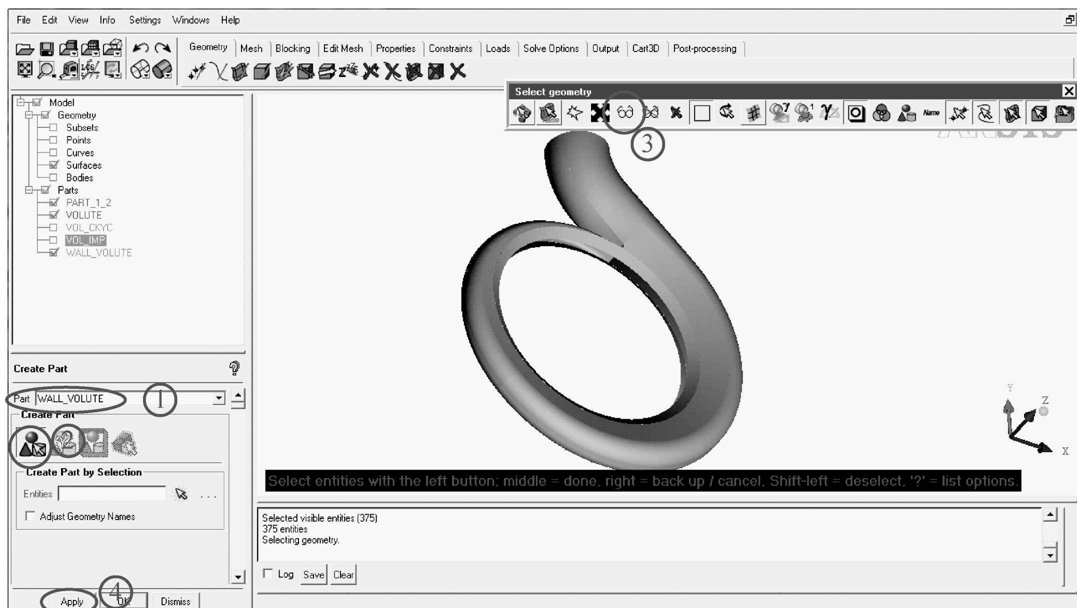


图 3-52 蜗壳壁面 part 创建图

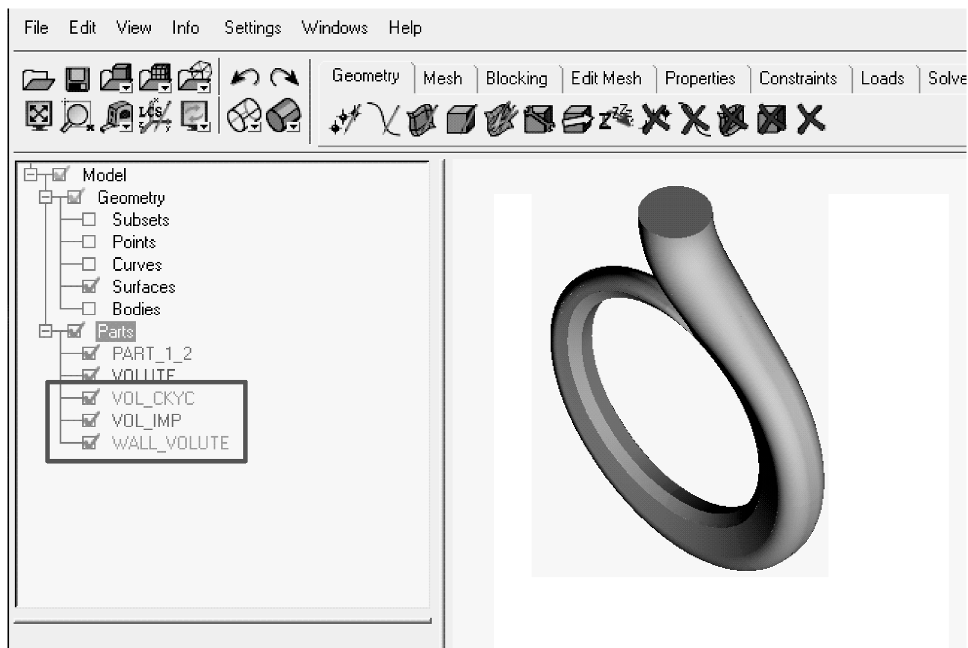


图 3-53 蜗壳 part 创建结果图

7）合并碎面，由于蜗壳碎面太多（常出现在隔舌附近，如图 3-54 所示），因此需要合并一些面，从而删除一些碎线，图 3-54 为合并碎面的方法。单击【Geometry】标签，选择【Create/Modify Surface】，弹出左下侧的选项栏，选择【Merge/Reapproximate Surfaces】单击，在下方 上单击，并在右侧窗口内选中要合并的表面，单击鼠标中键或选项栏中的【Apply】按钮。

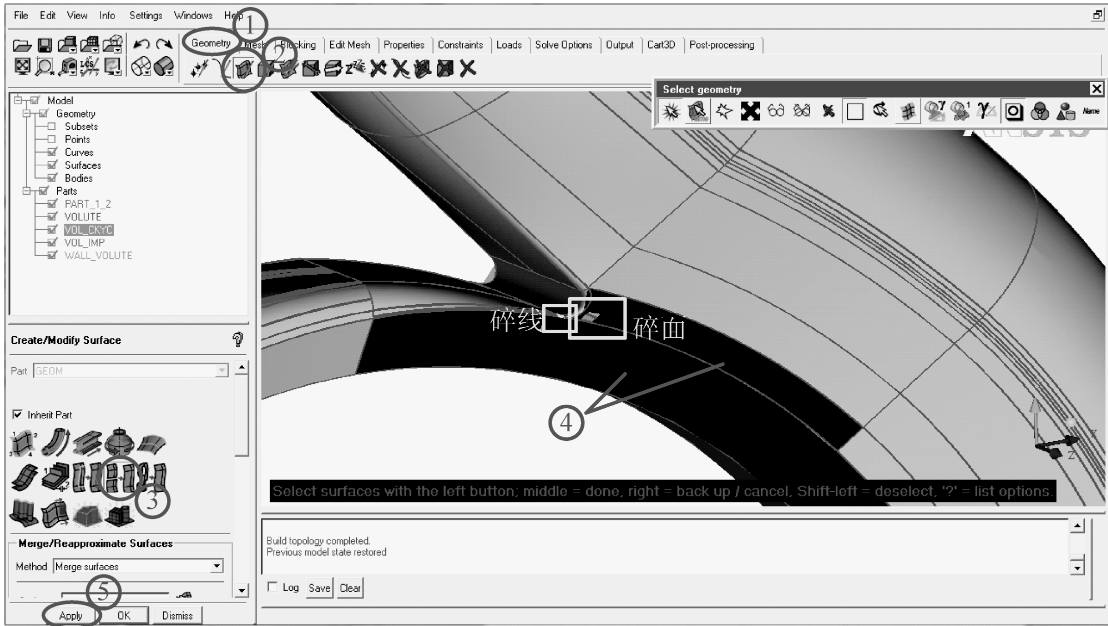


图 3-54　合并碎面

再一次创建几何拓扑如步骤 4)，捕捉到无碎线的整体蜗壳几何体，结果如图 3-55 所示。

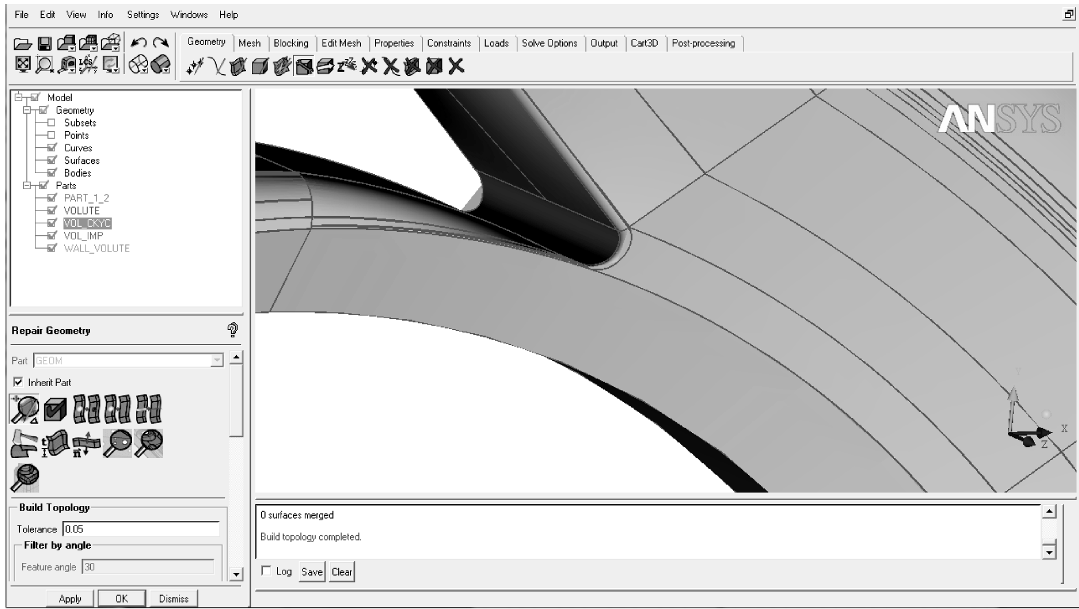


图 3-55　无碎面及碎线的蜗壳几何拓扑

8）赋予网格尺寸。

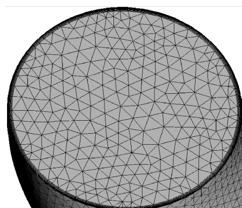
9）设定混合网格算法。

10）混合网格设置。

11）生成混合网格。

12）光顺混合网格。

13）导出计算网格文件，如图 3-56 和图 3-57 所示。



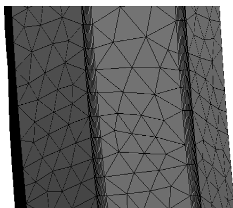


图 3-56　最终网格

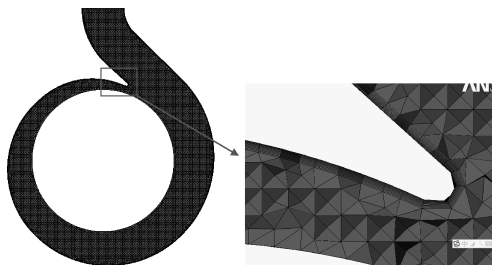


图 3-57　蜗壳中截面网格剖面视图及局部放大图

3.2.3　进出口延长段混合网格生成

与叶轮及蜗壳相似，离心泵的进出口延长段混合网格划分过程如下：

1）打开 ICEM，创建工作目录。

2）新建文件分别为 INLET. prj 及 OUTLET. prj。

3）导入 stp 格式的几何文件。

4）分别保留进口延长段及出口延长段。

5）自动创建几何拓扑。

6）创建体，分别命名为 in_water 及 out_water。

7）创建 Part，即定义边界面、交界面以及壁面。

对于进口延长段需定义进口边界、进口延长段与叶轮的交界面以及进口延长段的壁面，其命名分别为 inlet，jkyc_imp，wall_jkyc。

对于出口延长段需定义出口边界、叶轮与出口延长段的交界面以及出口延长段的壁面，其命名分别为 outlet，imp_ckyc，wall_ckyc。

8）赋予网格尺寸。

9）设定混合网格算法。

10）混合网格设置。

11）生成混合网格。

12）光顺混合网格。

13）导出计算网格文件，如图 3-58、图 3-59 所示。

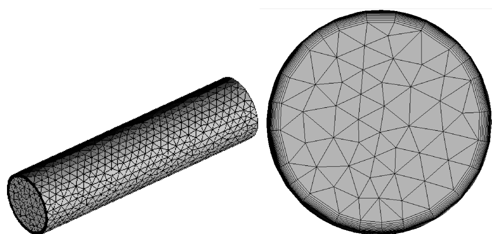


图 3-58　进口延长段非结构化网格

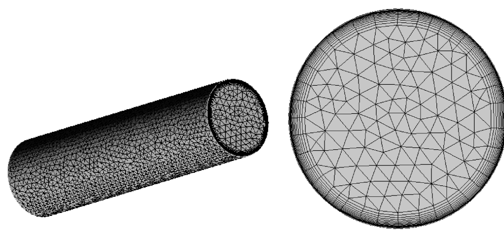


图 3-59　出口延长段非结构化网格

3.3　离心泵结构化网格划分

3.1.1　叶轮结构化网格划分

1）创建工作目录：打开 ICEM，单击【File】→【Change Working Dir…】，如图 3-60 所示，弹出如下对话框如图 3-61 所示，自定义工作目录。

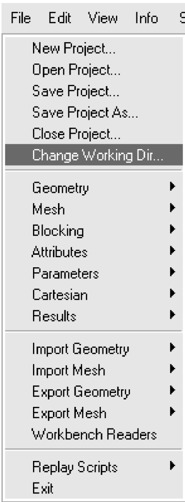


图 3-60　自定义工作目录选项图



图 3-61　设置工作目录对话框

2）新建文件：单击【File】→【New Project…】，创建叶轮网格文件 impeller. prj。

3）导入单流道叶轮 stp 格式的几何文件：单击【File】→【Import Geometry】→【STEP/IGES】，如图 3-62 所示，弹出如下对话框，如图 3-63 所示，选择文件并打开。

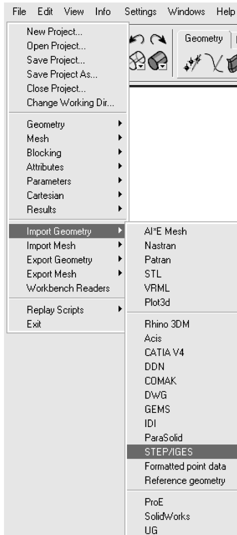


图 3-62　导入 stp 文件选项



图 3-63　选择文件对话框

导入叶轮的单流道几何文件，如图 3-64 所示。至于切分单流道是如何实现的，可以参考 Pro/E、Solidworks 和 UG 等三维造型软件的教程。这些专业软件来切分叶轮单流道操作较为简单，因此本书此处就不再赘述。

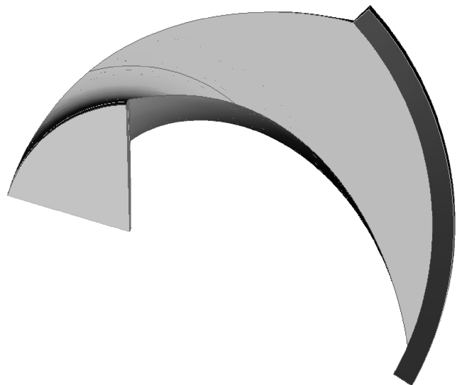


图 3-64　离心泵叶轮单流道模型

4）自动创建几何拓扑：单击【Geometry】标签，选择【Repair Geometry】，然后在左下侧的窗口中单击【Build Diagnostic Topology】，在下方的【Tolerance】输入框中输入相应值 0.1，该值可以接受程序默认值，读者也可以自行调整，直到几何边界线 Curves 都呈现红色或蓝色（红色为两个表面共有，蓝色为至少三个表面共有），当有黄色线显示时表明几何曲面不封闭，需要修复或者调整【Tolerance】值。最后单击【Apply】按钮，具体过程如图 3-65 所示。

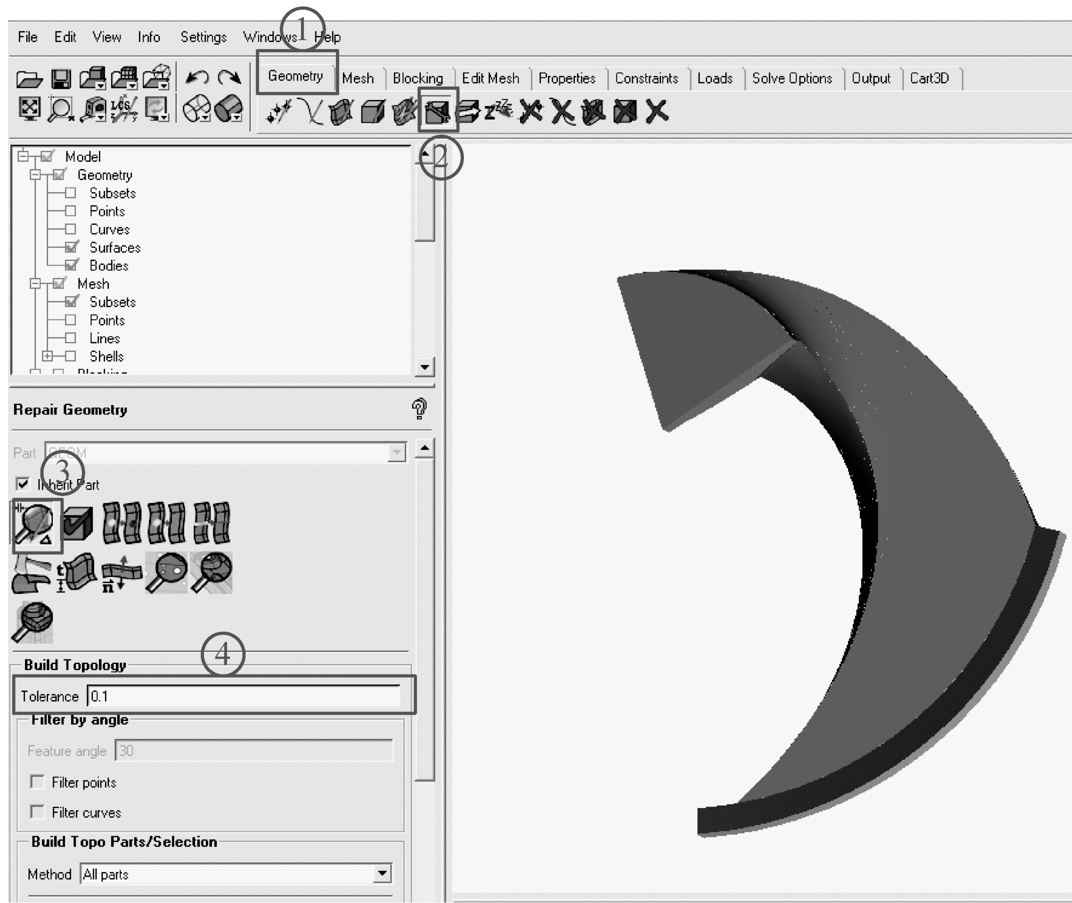


图 3-65　创建几何拓扑

5）创建体，体命名为 IMPELLER，单击【Geometry】标签，选择【Create Body】，然后在左下侧窗口中的【Part】输入框中输入几何体名 IMPELLER，单击【Material】，Loca-

tion 选择【At specified point】，然后选择体上的一个点，最后单击【Apply】按钮，创建过程及创建结果如图 3-66 所示。

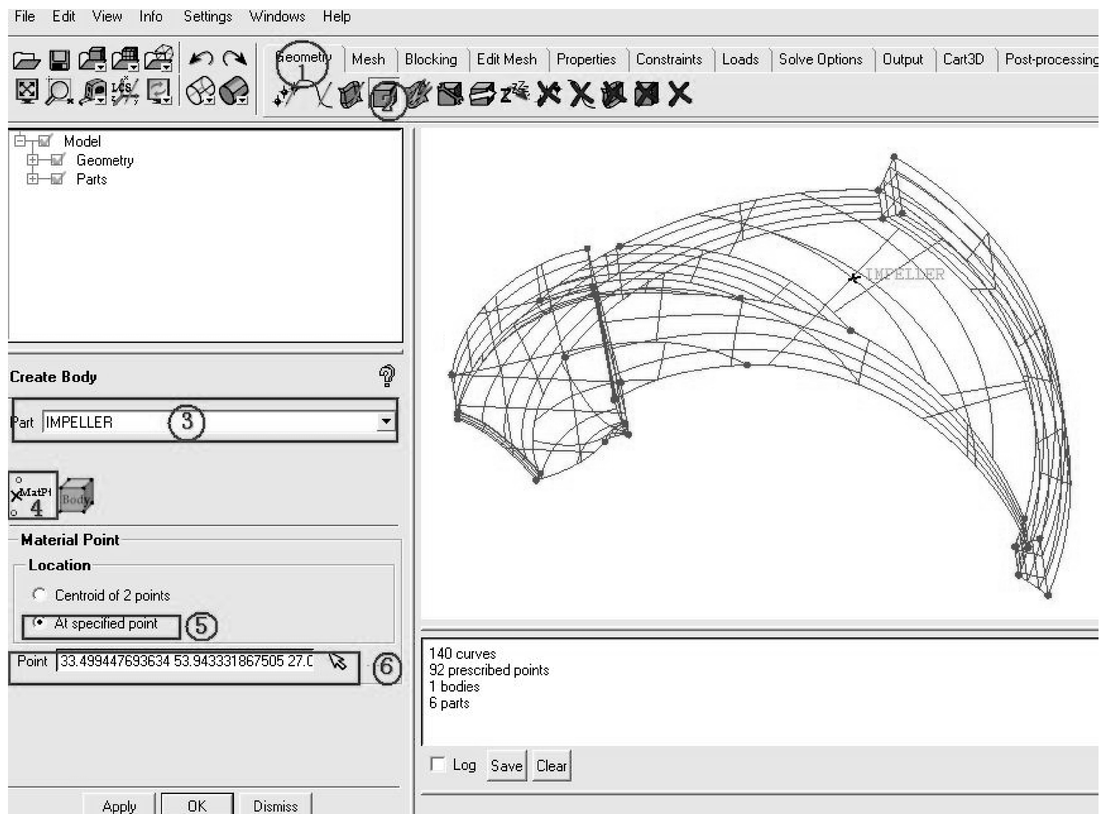


图 3-66　创建体

6）创建 Part，即定义周期面、边界面以及交界面。

首先定义周期面：右键单击【Parts】，再选择【Create Part】命令，如图 3-67 所示。在窗口左下侧的【Part】输入框中输入周期面【PERIC】，然后单击下面的【Create Part by Selection】，在右侧窗口中单击单流道叶轮的周期面，如图 3-68 所示，单击【Apply】按钮。

以同样的方法定义单流道叶轮进口、出口、前盖板、后盖板以及叶片，并分别命名为 IMPTOSUC、IMPTOVOL、SHROUD、HUB 和 BLADE，如图 3-69 所示。

7）创建初始网格拓扑结构，如图 3-70 所示。单击【Blocking】标签，选择【Create Block】，在左侧选项栏里，单击【Initialize Blocks】，然后选择并单击下方的【Select geometry】，在右侧窗口中选中叶轮进口的两个交界面 IMPTOSUC，单击鼠标中键或单击左下侧的【Apply】按钮，程序生成叶轮的初始网格拓扑结构，如图 3-70 中的黑色线框所示。

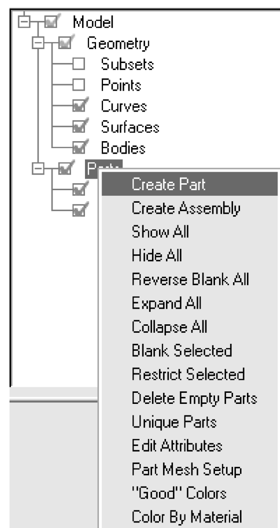


图 3-67　创建 Part

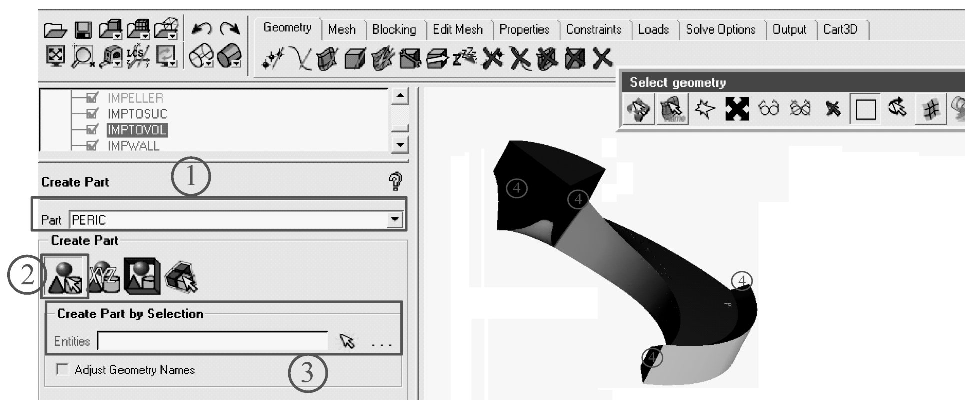


图 3-68　创建周期面

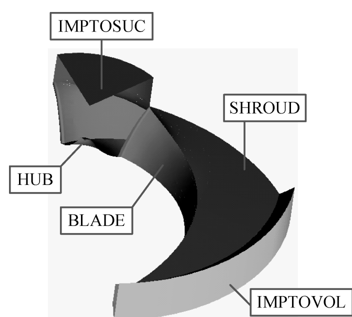


图 3-69　定义边界面

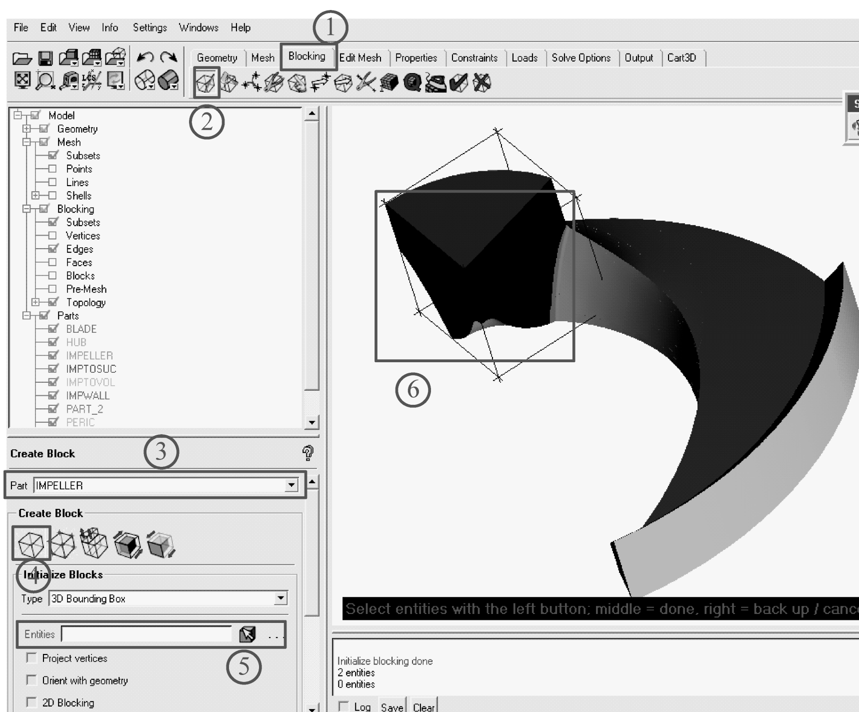


图 3-70　创建初始网格拓扑结构

8）定义网格周期性：本例中是单流道叶轮，其网格需要旋转复制才是完整流道的网格，因此需要定义网格周期性，来用于拓扑的定义和网格的复制操作。具体操作如图 3-71 所述，单击【Mesh】标签，选择【Global Mesh Setup】，在左侧选项栏里，单击【Set up Periodicity】，然后在【Periodicity Type】下勾选【Rotational periodic】；接着在【Rotational axis】的【Method】中选择【User defined by angle】；在【Base】输入框中输入周期选择的中心点，本例中的旋转中心点为（0，0，0）；在【Axis】输入框中输入旋转的轴，本例中为（0，0，1）；在【Angle】输入框中输入周期的角度，比如本例中的叶片数为 5，周期角度即为 360°/5 = 72°。最后单击下方的【Apply】按钮，完成网格周期性的定义。

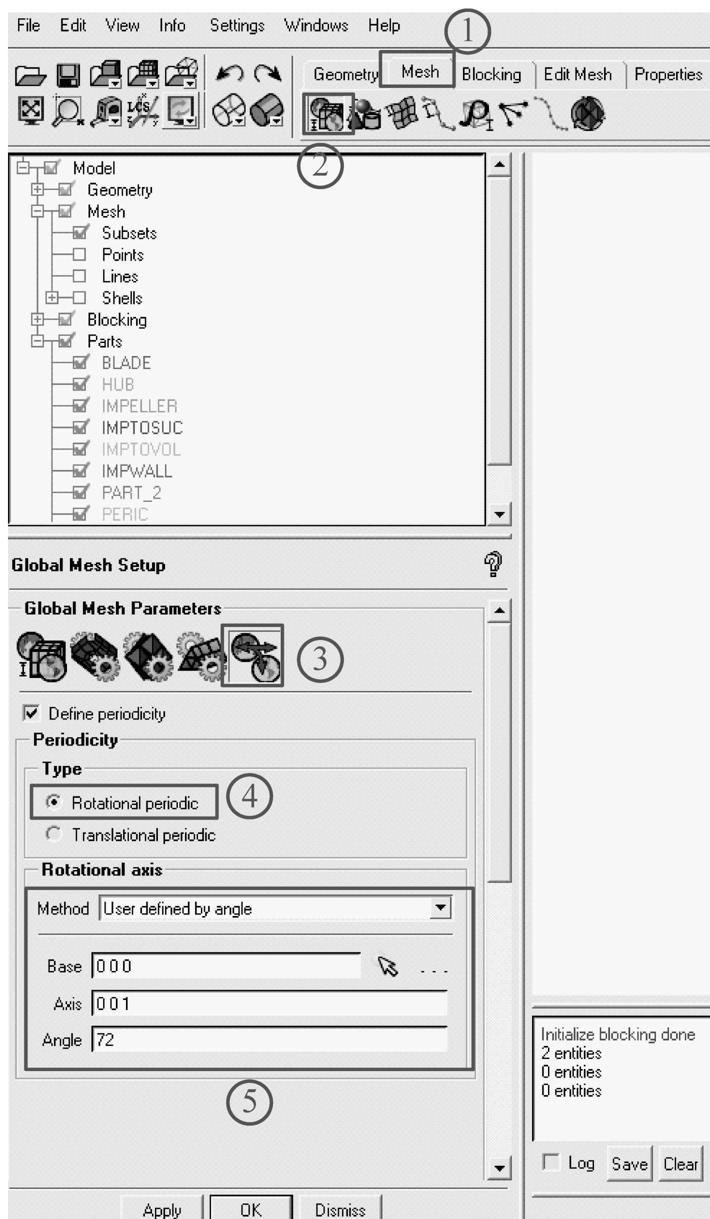


图 3-71　定义网格周期性

9）初始拓扑结构周期性定义：首先要对步骤 8）创建的拓扑结构进行周期性定义，操作如图 3-72 所示。单击【Blocking】标签，选择【Edit Block】，在左侧选项栏里，单击【Periodic Vertices】，在【Vertices】后单击，然后在右侧窗口中选中图中红色框内的两个拓扑点，结束后再单击选中蓝色框内的两个拓扑点，完成初始拓扑的周期性定义。

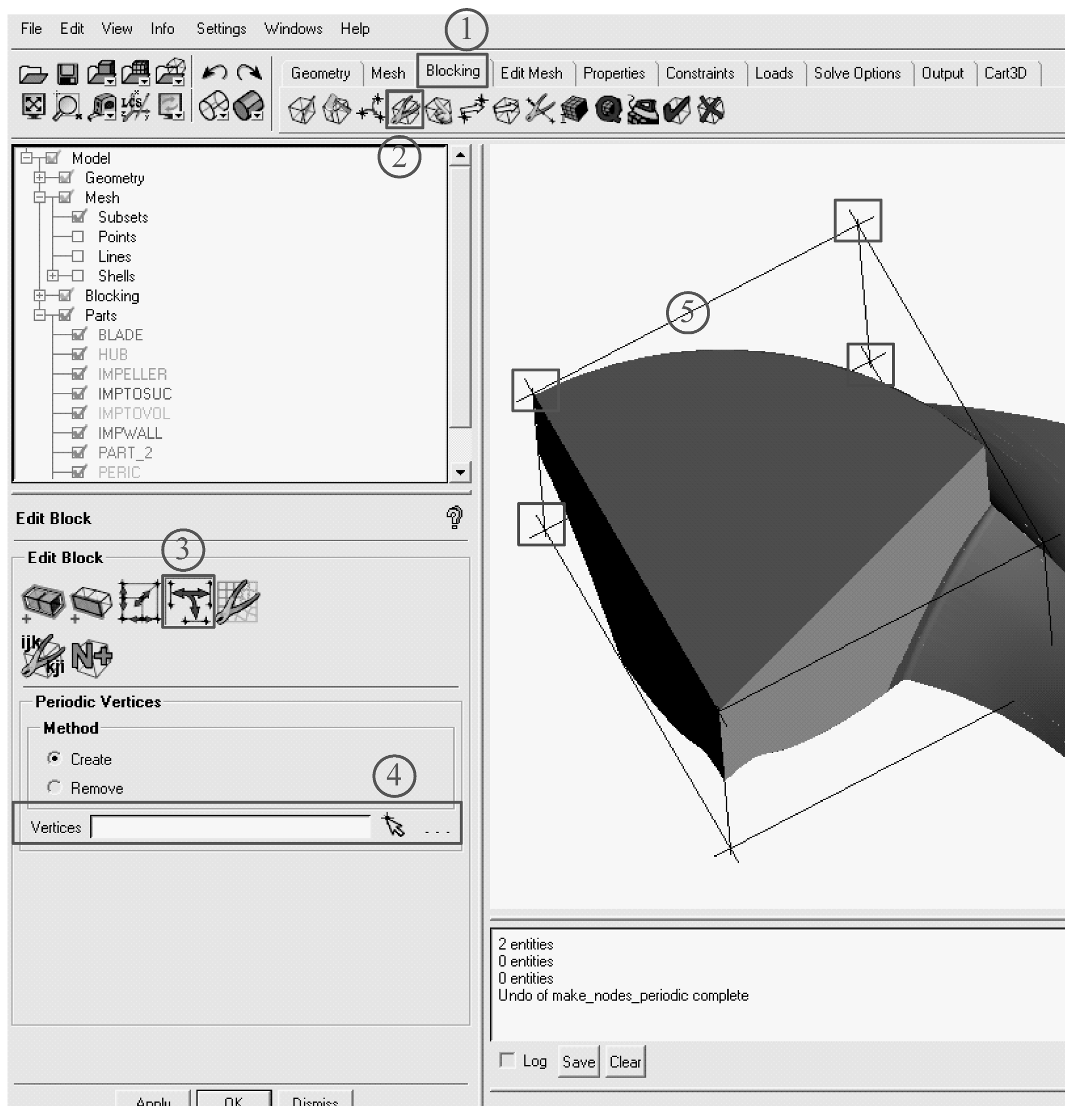


图 3-72 初始拓扑结构周期性定义

10）初始拓扑结构节点合并：这里要对叶轮中心点处的拓扑节点进行合并操作，这是由于中心点处不存在拓扑边线，只是一个拓扑点，因此要把初始生成的拓扑结构进行调整，把两个拓扑节点进行合并，具体操作如图 3-73 所示。单击【Blocking】标签，选择【Merge Vertices】，在左侧选项栏里，单击【Merge Vertices】，然后在右侧窗口中单击选中图中红色框内的两个拓扑点，结束后再选中蓝色框内的两个拓扑点，完成初始拓扑结构节点合并操作。

图3-73 初始拓扑结构周期性定义

11）初始拓扑结构的点关联：创建叶轮流道网格之前，首先对初始拓扑结构与叶轮结构进行点关联，有利于下一步拓扑结构的调整，具体操作如图3-74所示。单击【Blocking】标签，选择【Associate】，在左下侧选项栏里，单击【Associate Vertex】，在下方【Vertex】单击，然后在右侧窗口中选中图中红色框内的拓扑点，接着单击左下侧窗口中的，再在右侧窗口中选中红色框内的叶轮结构点，单击鼠标中键或者单击左下侧窗口中的【Apply】按钮，完成初始拓扑结构的点关联操作。按照上述的操作对其余的拓扑节点进行关联，依次关联到叶轮结构上对应的点，关联后的形状如图3-75所示。

12）初始拓扑结构"Y" block划分：由于叶轮轮毂直径为0，为了避免叶轮进口网格质量负体积，需创建"Y"型block拓扑结构，具体操作如图3-76所示。单击【Blocking】标签，选择【Edit Block】，在左下侧选项栏里，单击【Convert Block Type】按钮，在下方【Type】的选项里选择【Y-Block】，在【Blocks】上单击，然后在右侧窗口中选中初始拓

扑结构的 Block 块，最后单击鼠标中键或者单击左下侧窗口中的【Apply】按钮，完成初始拓扑结构的“Y”Block 划分的操作。

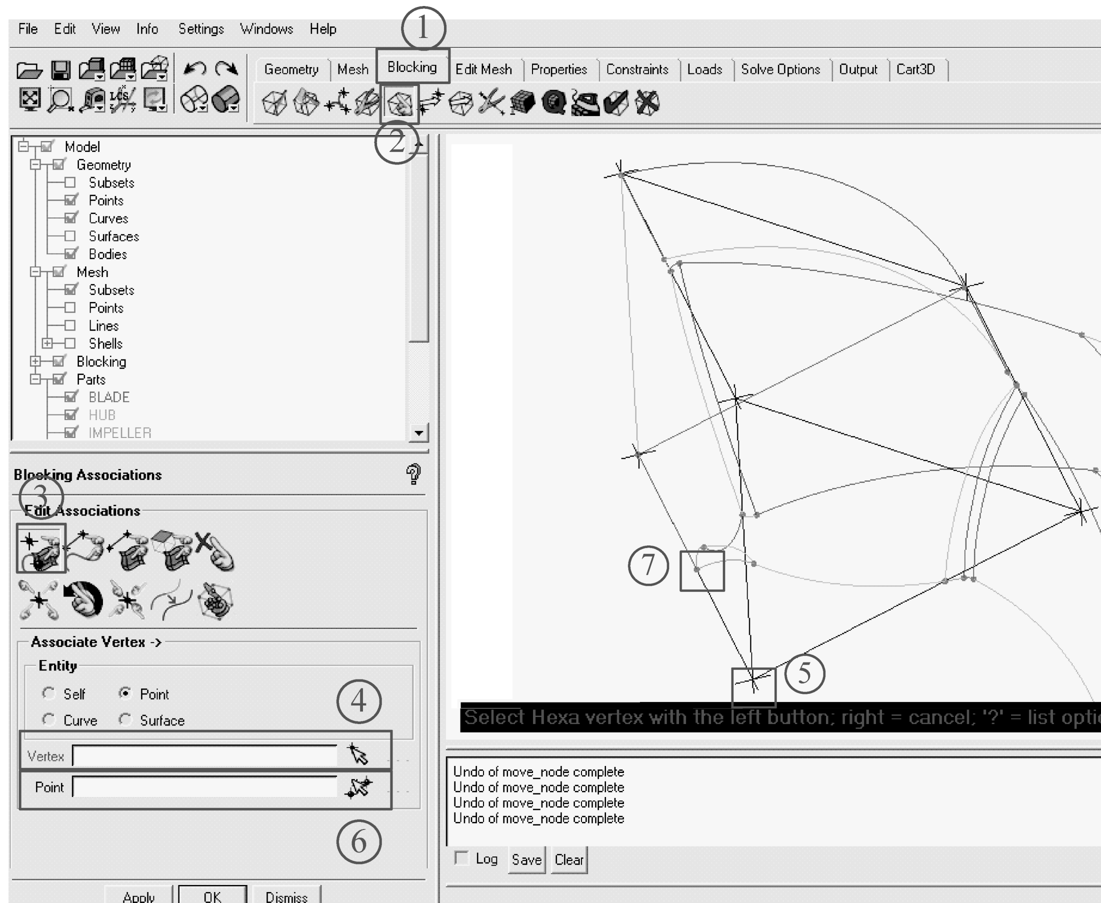


图 3-74　初始拓扑结构关联

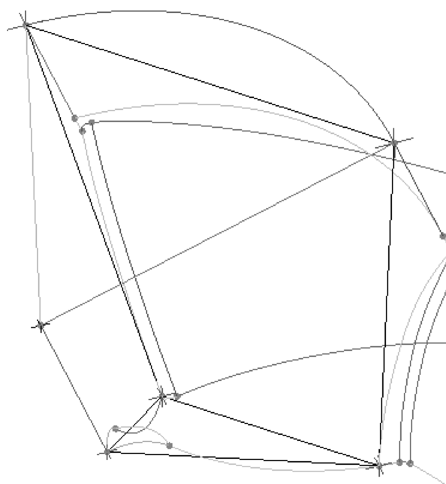


图 3-75　初始拓扑结构关联结果

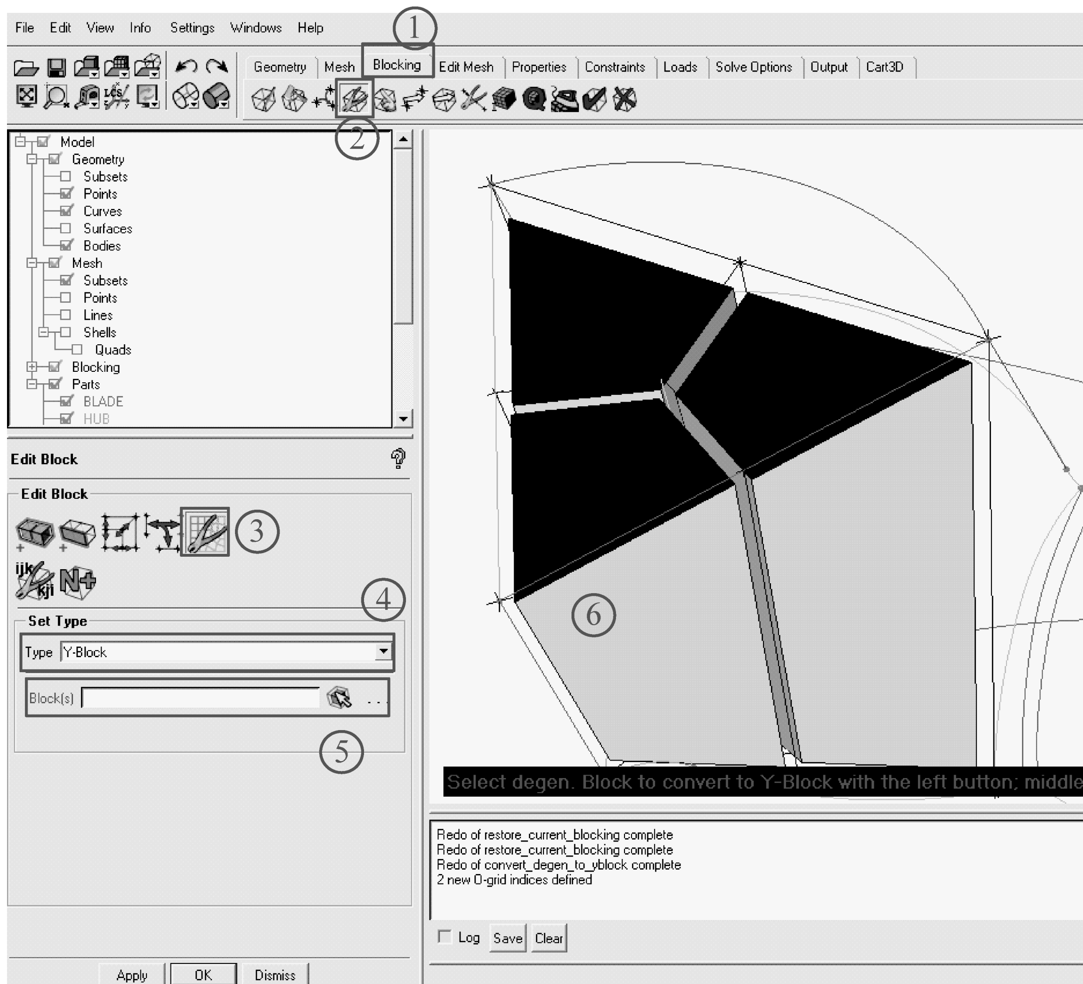


图 3-76　“Y”型 block 创建过程

13）叶轮流道主体 Block 创建：创建完叶轮进口部分的拓扑结构，进而通过调整和拉伸等操作来完成叶轮流道主体 Block 的创建操作，具体过程如图 3-77 所示。单击【Blocking】标签，选择【Split Block】并单击，在左下侧选项栏里，单击【Split Block】，在下方【Block Select】中勾选【All Visible】，在【Edge】后单击，然后在右侧窗口中选中 Block 的边（如图中的红色框内），最后单击鼠标中键或者单击左下侧窗口中的【Apply】按钮，完成初始拓扑结构的切分操作。

下面通过拓扑的延伸创建叶轮流道网格的主题 Block 结构，具体操作如图 3-78 所示。单击【Blocking】标签，选择【Create Block】，在左下侧选项栏里，单击【Extrude Faces】，在下方【Method】中选择【Fixed distance】，在【Select Faces】后单击，然后在右侧窗口中选中 Block 的 faces（如图中的红色框内）；接着在【Distance】输入框中输入延伸的长度，本例中输入 100（读者可以根据模型需要进行调整），最后单击左下侧窗口中的【Apply】按钮，完成初始拓扑结构的延伸操作。延伸后的拓扑如图 3-79 所示。

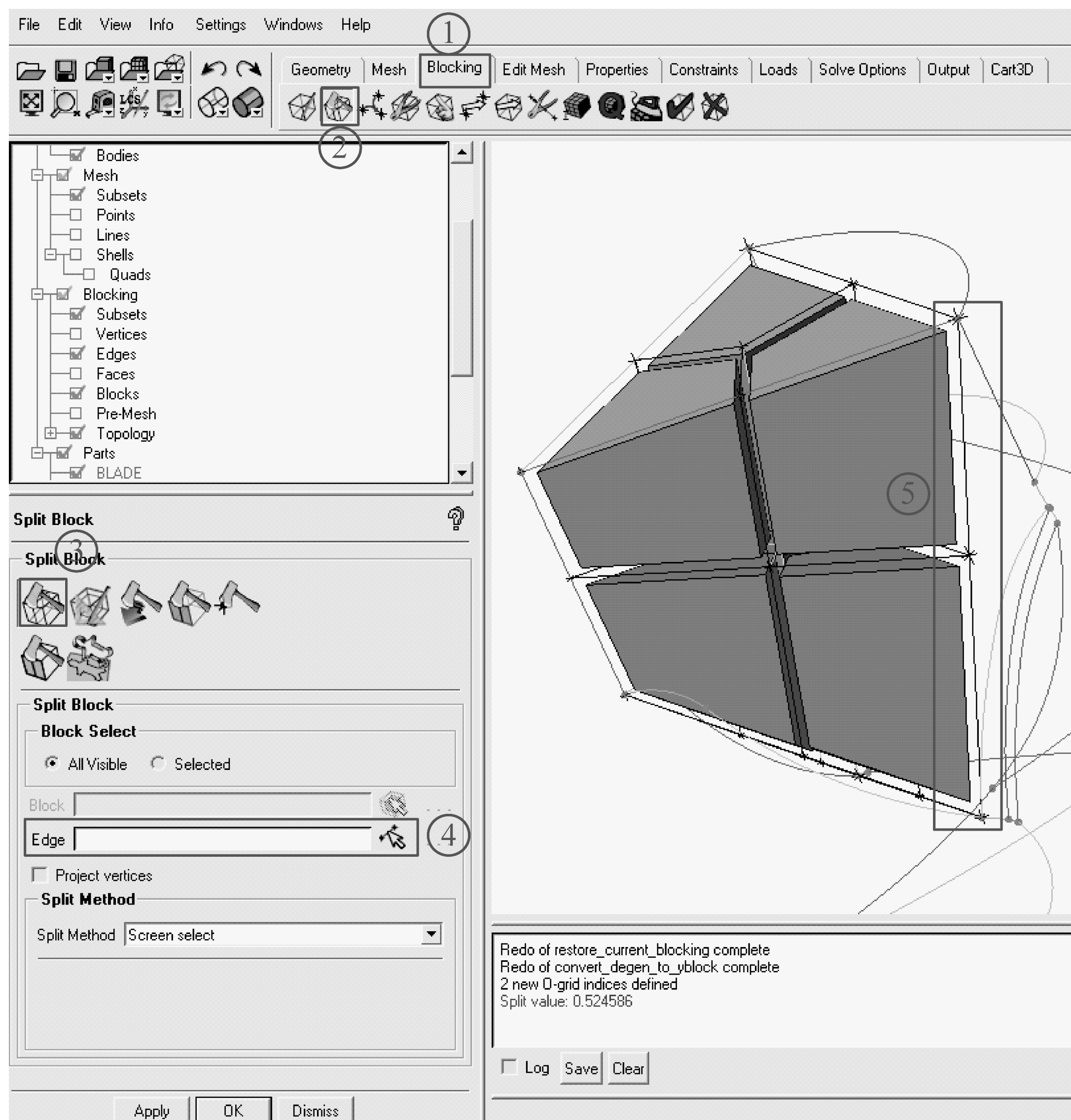


图 3-77　Block 的切分操作

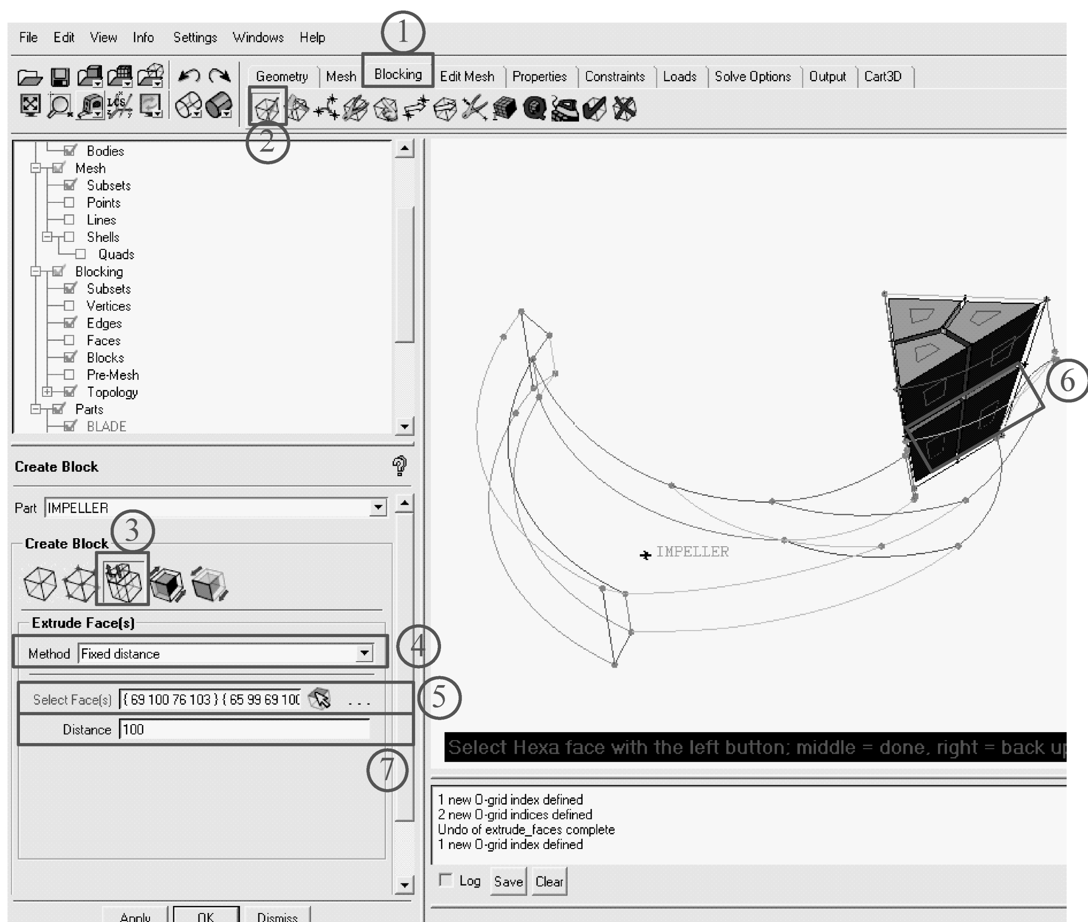


图 3-78　Block 的延伸操作

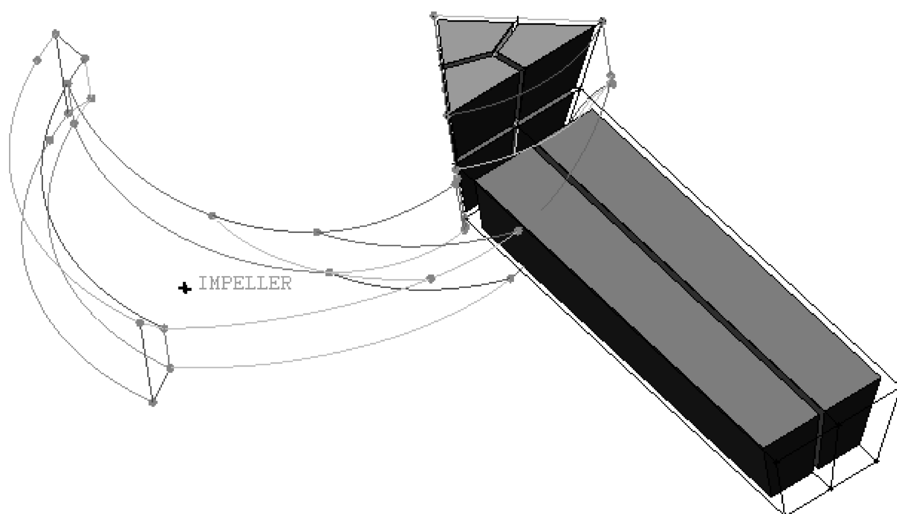


图 3-79　Block 的延伸结果

接下来对延伸的 Block 进行调整以形成叶轮主流道的拓扑结构，首先进行拓扑的修剪工作，具体操作如图 3-80 所示。单击【Blocking】标签，选择【Split Block】，在左下侧选项栏里，单击【Split Block】，在下方【Block Select】中勾选【Selected】，在【Block】中单击，然后在右侧窗口中单击选中⑥所标识的 Block 块（叶轮主题 Block 的右侧部分）；接着在【Edge】单击，在右侧的窗口中选择⑥标识的 Block 的边界并在上面单击（如图红色框中的拓扑边界）；最后单击鼠标中键或者单击左下侧窗口中的【Apply】按钮，完成叶轮主流道拓扑结构的修剪操作。

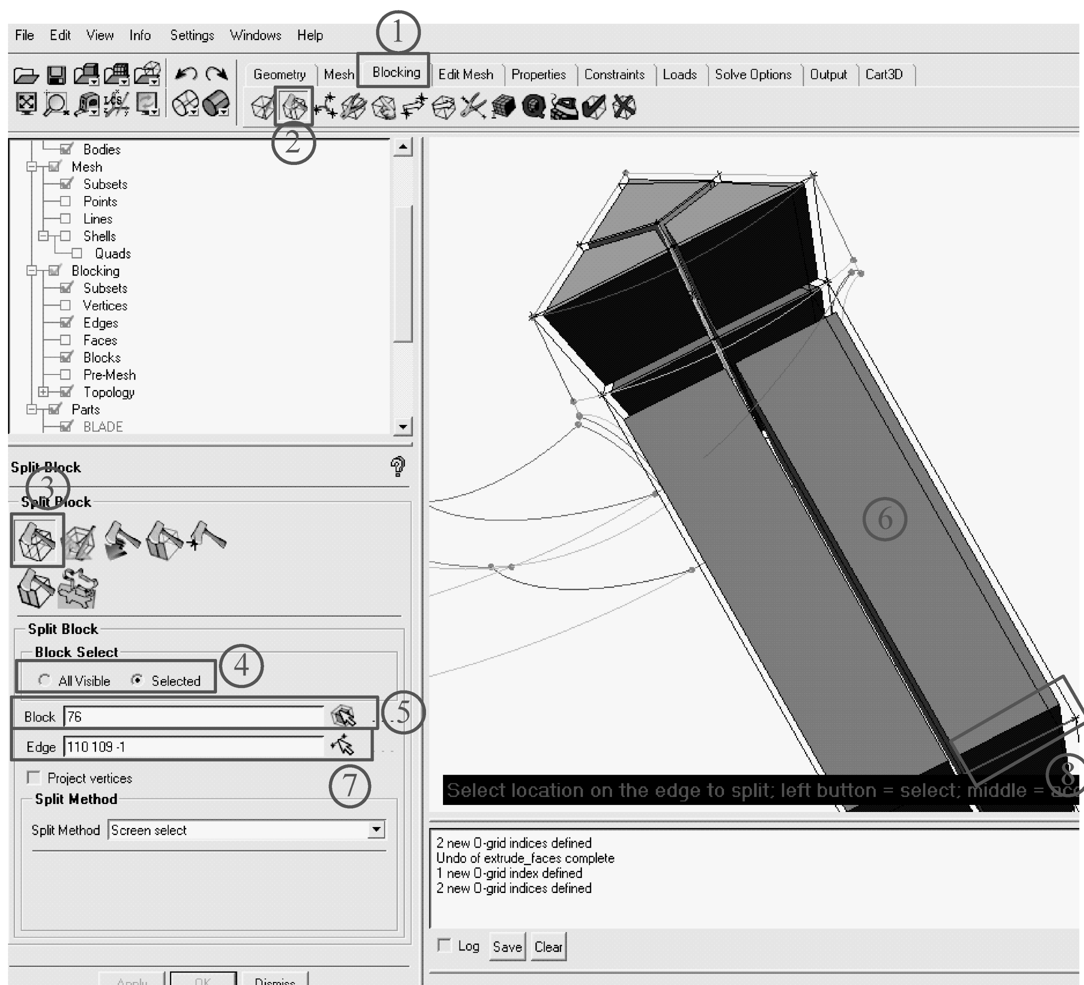


图 3-80　叶轮主流道 Block 的修剪操作

最后切除修剪后的 Block，删除的部分对应于叶轮的叶片结构部分，删除后保留的是叶轮主流道的拓扑结构，具体操作如图 3-81 所示。单击【Blocking】标签，选择【Delete Block】，在左下侧选项栏里，在【Blocks】后单击，然后在右侧窗口中单击选中④所标识的 Block 块（即上一步修剪后的 Block），最后单击鼠标中键或者单击左下侧窗口中的【Apply】按钮，完成拓扑结构的切除操作。

通过以上几步的操作，完成了叶轮主流道网格拓扑结构的创建。

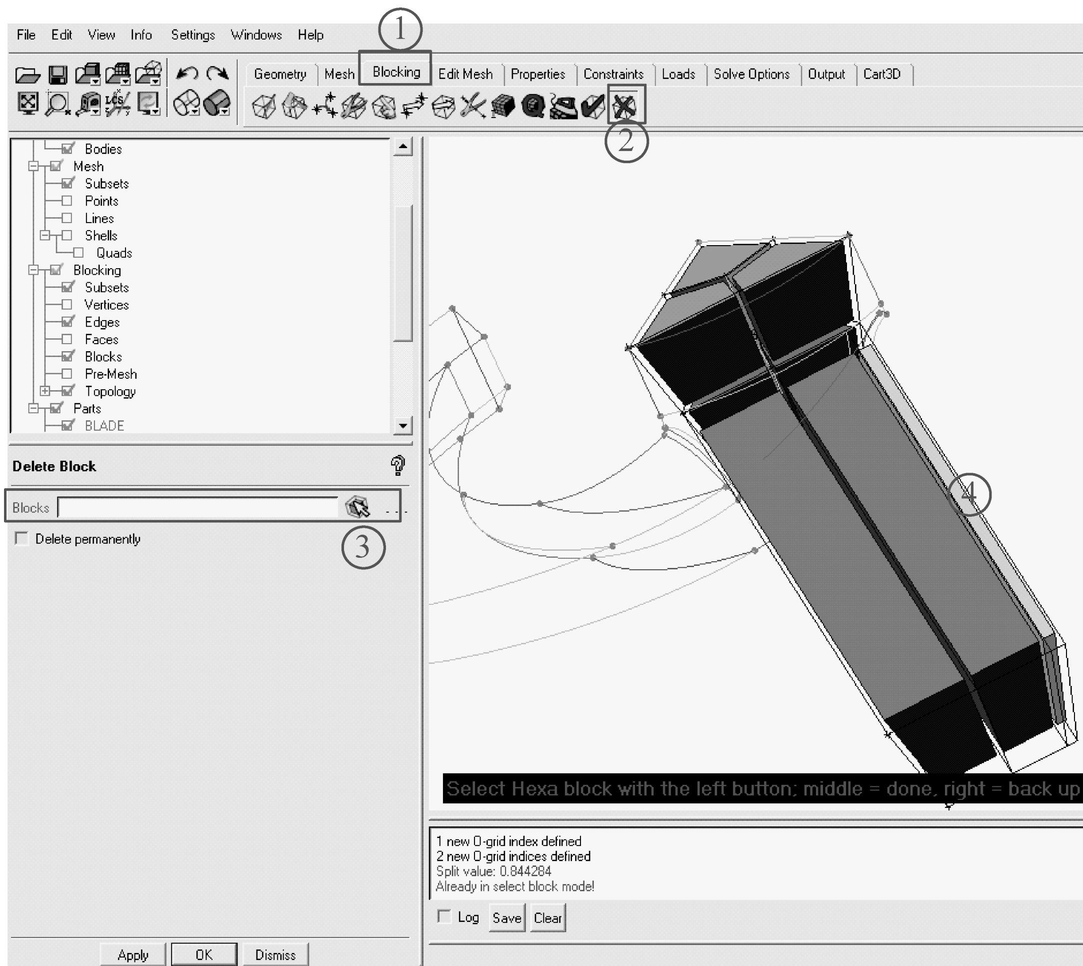


图 3-81　叶轮 Block 的切除操作

14）叶轮主流道拓扑结构的点关联：下面对叶轮主流道拓扑结构与对应的叶轮结构进行点关联，具体操作如图 3-82 所示。单击【Blocking】标签，选择【Associate】，在左下侧选项栏里，单击【Associate Vertex】，在下方【Vertex】后单击，然后在右侧窗口中单击选中⑤线所连接的拓扑节点（如图红色圈内的点）；接着在【Point】后单击，在右侧的窗口中选择⑤线所连接的叶轮边线上的点（如图蓝色圈内的点）；最后单击鼠标中键或者单击左下侧窗口中的【Apply】按钮，按照上述操作依次完成叶轮主流道拓扑结构的点关联操作。点关联后的拓扑结构如图 3-83 所示。

15）叶轮出口延长段拓扑创建：创建完叶轮主流道拓扑结构之后，进一步创建叶轮出口延长段的拓扑，具体操作如图 3-84 所示。单击【Blocking】标签，选择【Create Block】，在左下侧选项栏里，单击【Extrude Faces】，在下方【Method】中选择【Fixed distance】，在【Select Faces】后单击，然后在右侧窗口中单击选中 Block 的 faces（如图中的蓝色面）；接着在【Distance】输入框中输入延伸的长度，本例中输入 -10，读者可以根据模型需要进行调整，最后单击左下侧窗口中的【Apply】按钮，完成叶轮出口延长段的延伸操作。





图 3-82　叶轮主流道拓扑结构的点关联

图 3-83　叶轮主流道拓扑结构的点关联结果

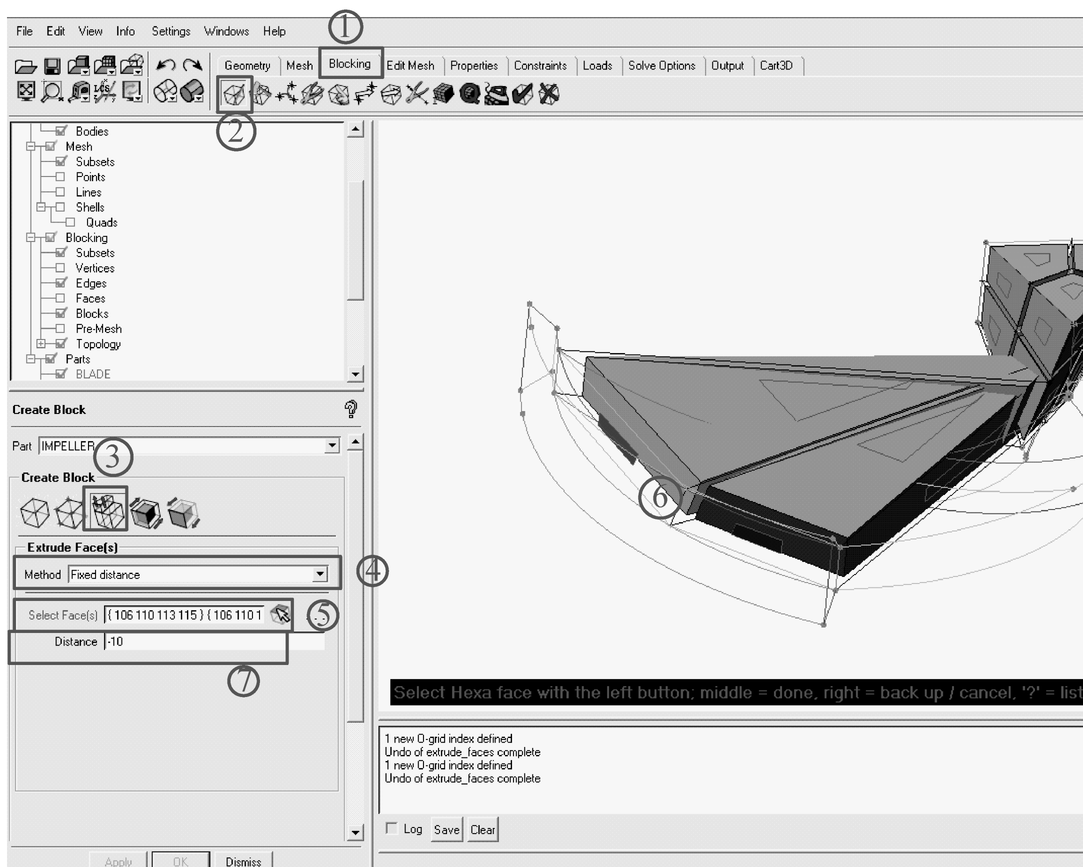


图 3-84　叶轮出口延长段拓扑结构创建

进一步延伸出叶轮出口段的周期面，操作与上面相同，延伸后的拓扑结构如图 3-85 所示。

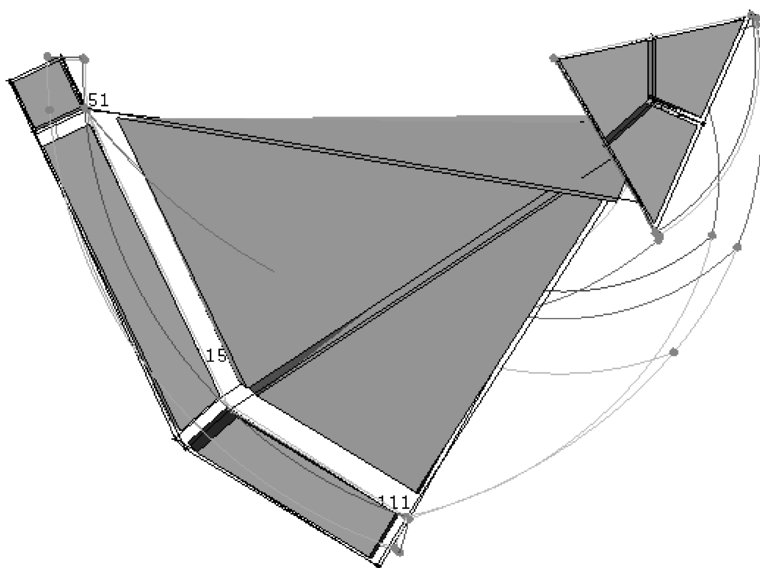


图 3-85　叶轮出口延长段拓扑结构创建

16）叶轮出口段拓扑结构的点关联：该步的操作与上述点关联操作相同，不再赘述，将叶轮出口段拓扑结构的节点与结构对应的点进行关联。

17）叶轮整体拓扑结构的线关联：进行完叶轮拓扑结构的点关联后，进行叶轮整体拓扑结构的线关联。首先关联叶轮出口段拓扑线，具体操作如图 3-86 所示。单击【Blocking】标签，选择【Associate】，在左下侧选项栏里，单击【Associate Edge to Curve】，在下方【Edges】后单击，然后在右侧窗口中选中⑤所示的红色拓扑线。接着在【Curves】后单击，在右侧的窗口中选择⑦所示的叶轮出口延长段的边线；最后单击鼠标中键或者单击左下侧窗口中的【Apply】按钮，按照上述操作依次完成叶轮出口延长段拓扑结构的线关联操作。

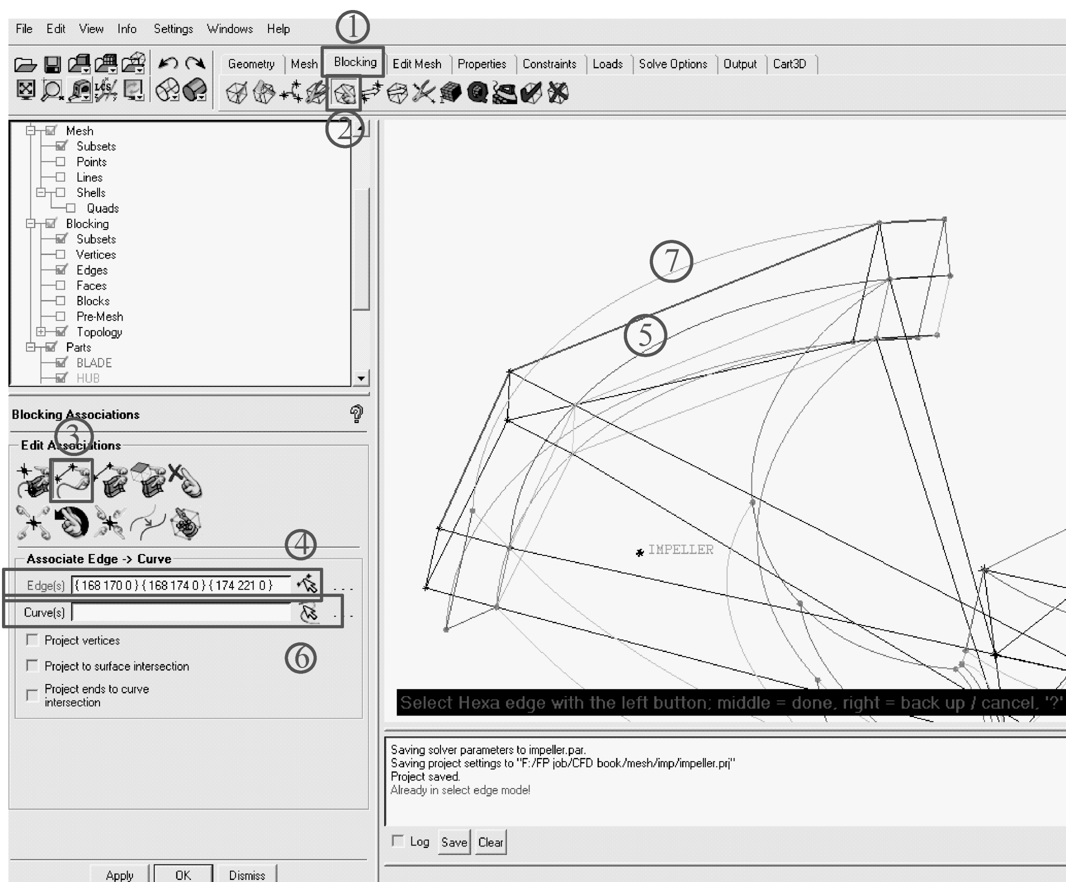


图 3-86　叶轮出口延长段拓扑线关联

接着进行叶轮主流道拓扑的线关联。如图 3-87 所示，单击【Blocking】标签，选择【Associate】，在左下侧选项栏里，单击【Associate Edge to Curve】，在下方【Edges】后单击，然后在右侧窗口中单击选中⑤下标识的绿色拓扑线；接着在【Curves】后单击，在右侧的窗口中选择⑦所示的叶轮前盖板的边线（如图中黑色线所示）；最后单击鼠标中键或者单击左下侧窗口中的【Apply】按钮，按照上述操作依次完成叶轮主流道拓扑结构的线关联操作。

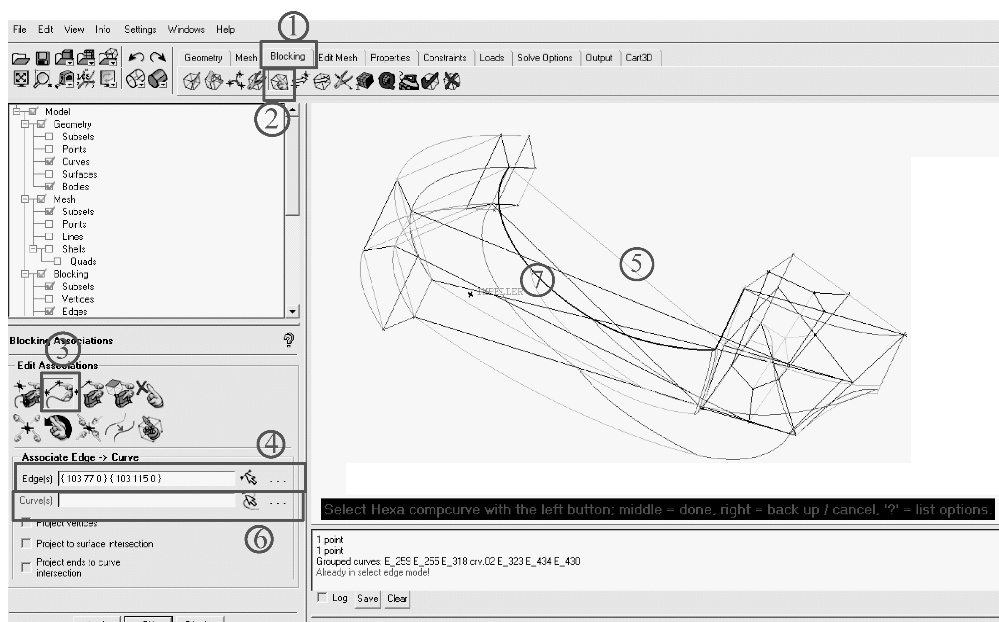


图 3-87　叶轮主流道拓扑结构的线关联

18）叶轮拓扑适应结构：由于拓扑结构并没有与结构曲面完全贴合，为了后续操作的方便，这一步进行拓扑适应结构操作，操作步骤如图 3-88 所示。单击【Blocking】标签，选择【Associate】，在左侧选项栏里，单击【Snap Project Vertices】，然后单击【Apply】按钮，拓扑自动适应到结构上去，如图 3-88 所示。

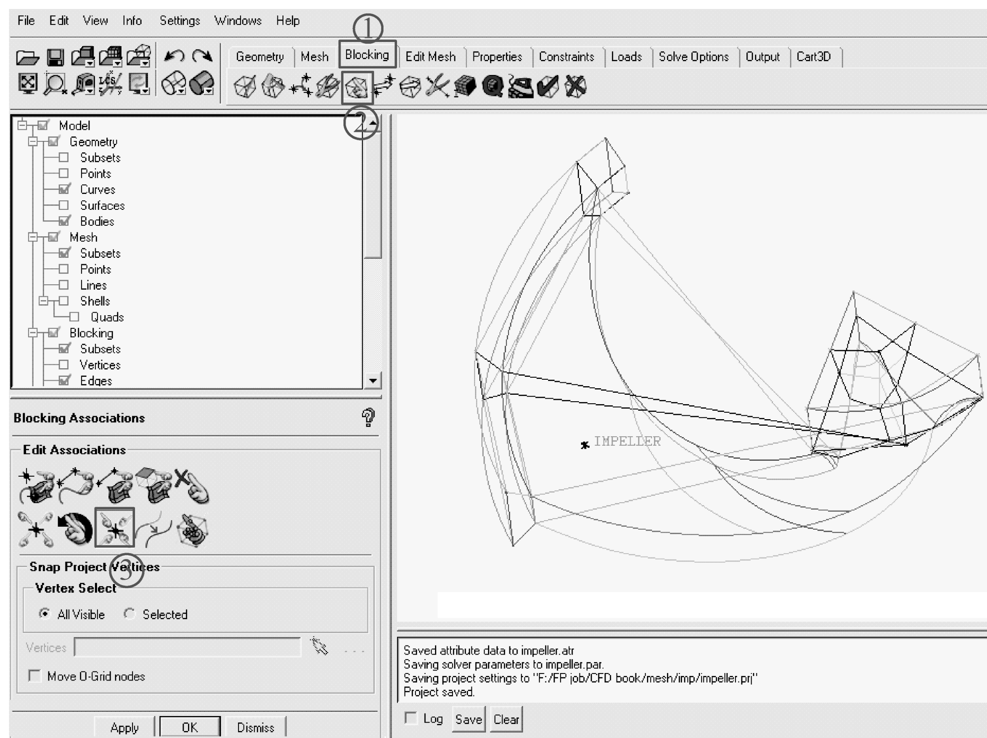


图 3-88　叶轮拓扑适应叶轮结构

19）赋予网格尺寸：首先设定网格的全局尺寸，如图 3-89 所示。单击【Mesh】标签，选择【Global Mesh Setup】，在左侧选项栏里，在【Max element】选项栏里输入 3，单击【Apply】按钮，完成全局网格尺寸赋值。接下来将设定的网格尺寸赋给拓扑结构，如图 3-90 所示。单击【Blocking】，然后单击【Pre-Mesh Params】，在左下侧的选项栏中选择【Update Sizes】，然后单击【Apply】按钮，程序将网格参数赋给了拓扑结构。

20）生成网格：勾选左上侧窗口中的【Pre-Mesh】，如图 3-91 所示，生成结构网格。

21）修改叶轮拓扑结构：目前的叶轮拓扑结构，经过网格质量检查，网格质量极低。网格质量检查的方法如图 3-92 所示。单击【Blocking】标签，选择【Pre-Mesh Quality Histograms】，在左下侧选项栏里，将【Criterion】选项里选为 Determinant 2 ×2 ×2，在【Max-Y height】中输入 20，单击【Apply】按钮，可以查看结构网格质量。

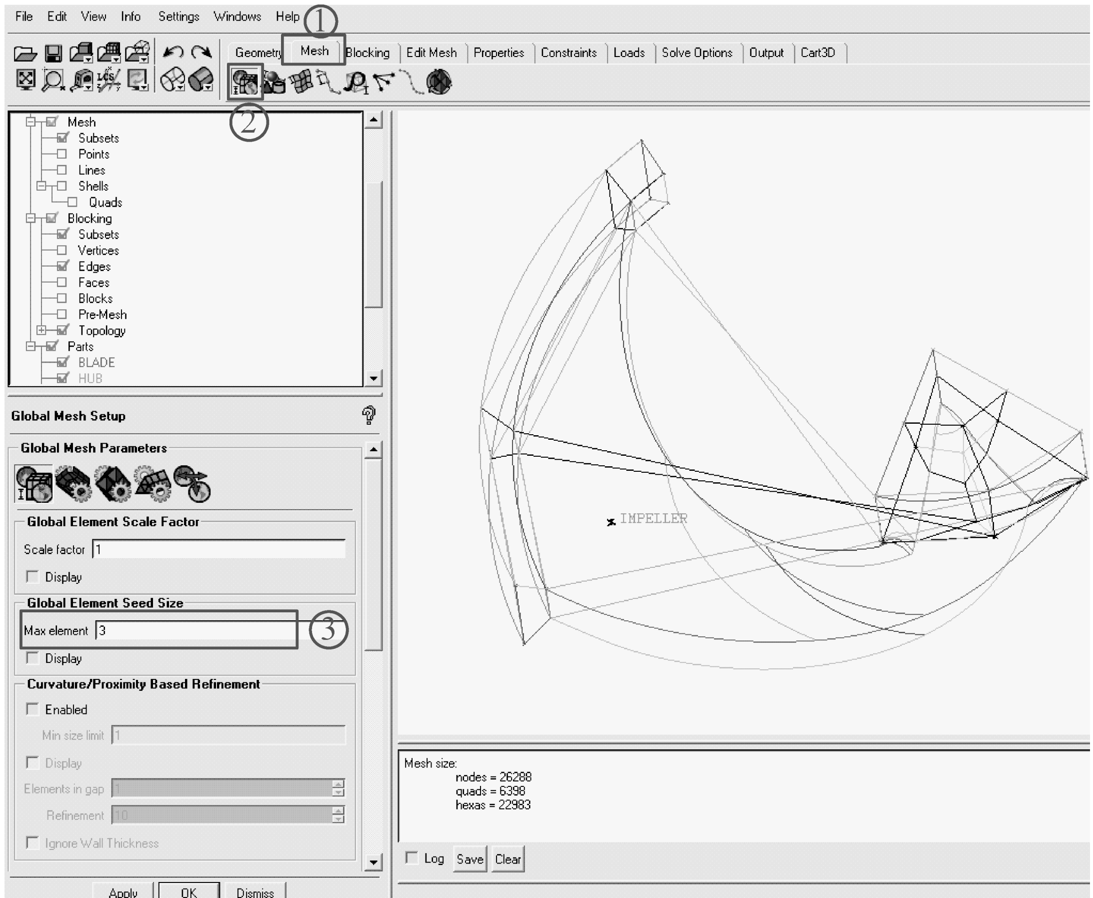


图 3-89　全局网格赋值

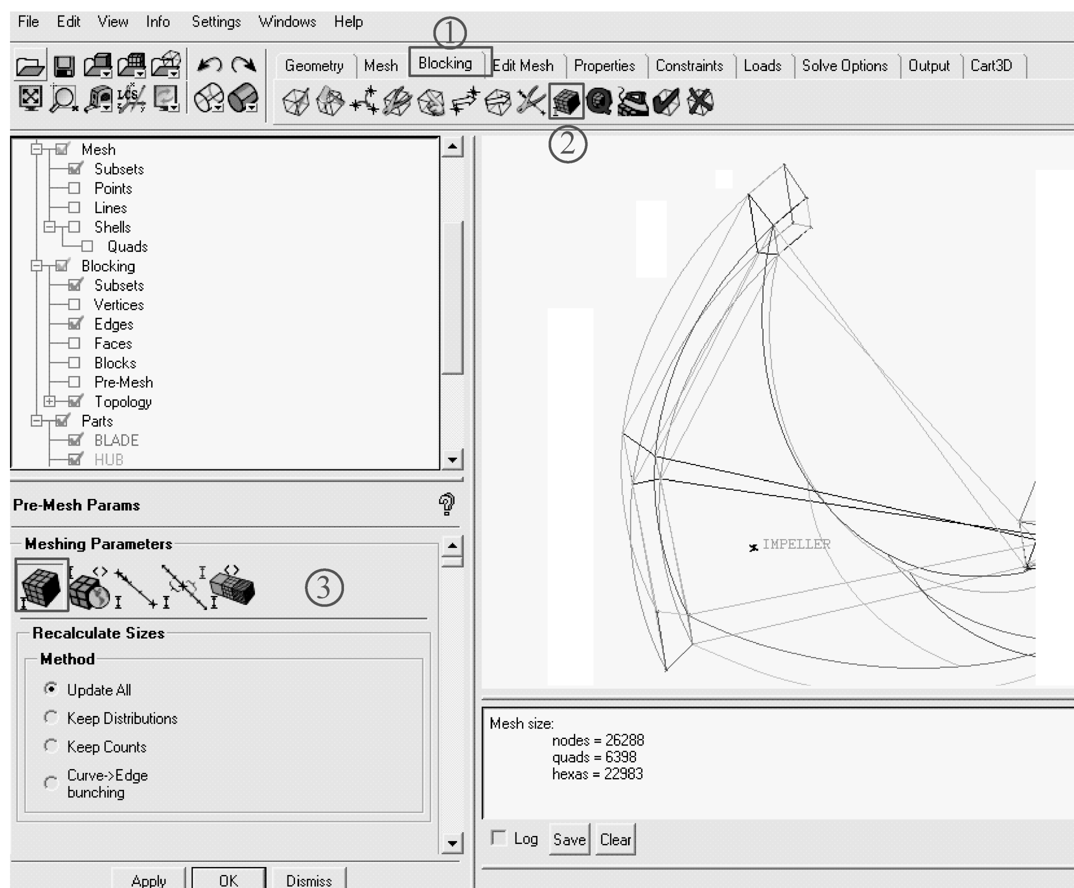


图 3-90　网格值赋予拓扑结构

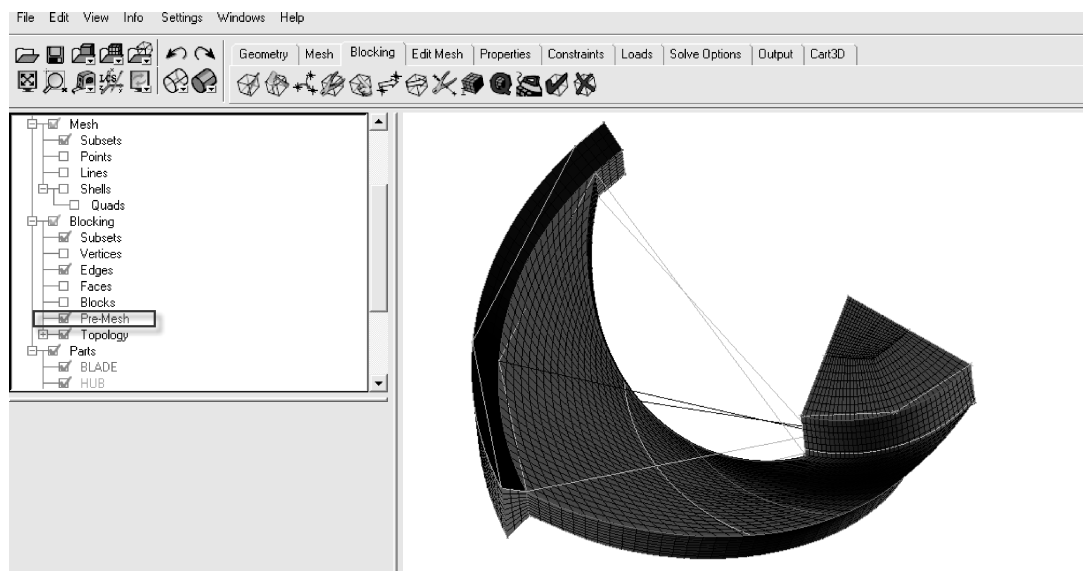


图 3-91　生成叶轮结构网格

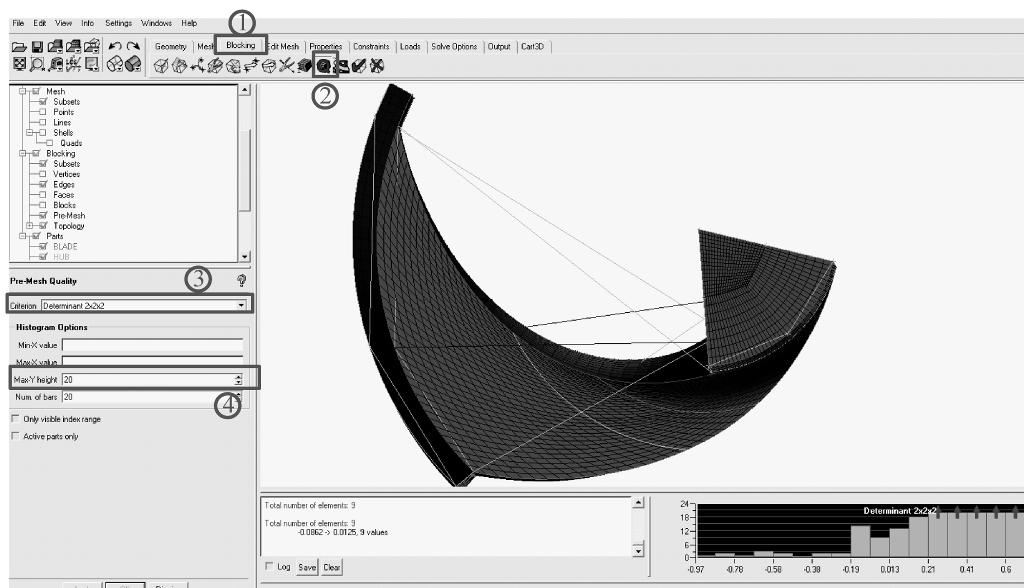


图 3-92 查看叶轮结构网格质量

解决这一问题的方法是对拓扑结构进行一定的切分，如图 3-93 所示。单击【Blocking】标签，选择【Split Block】，在左下侧选项栏里，单击【Split Block】，在下方【Block Select】

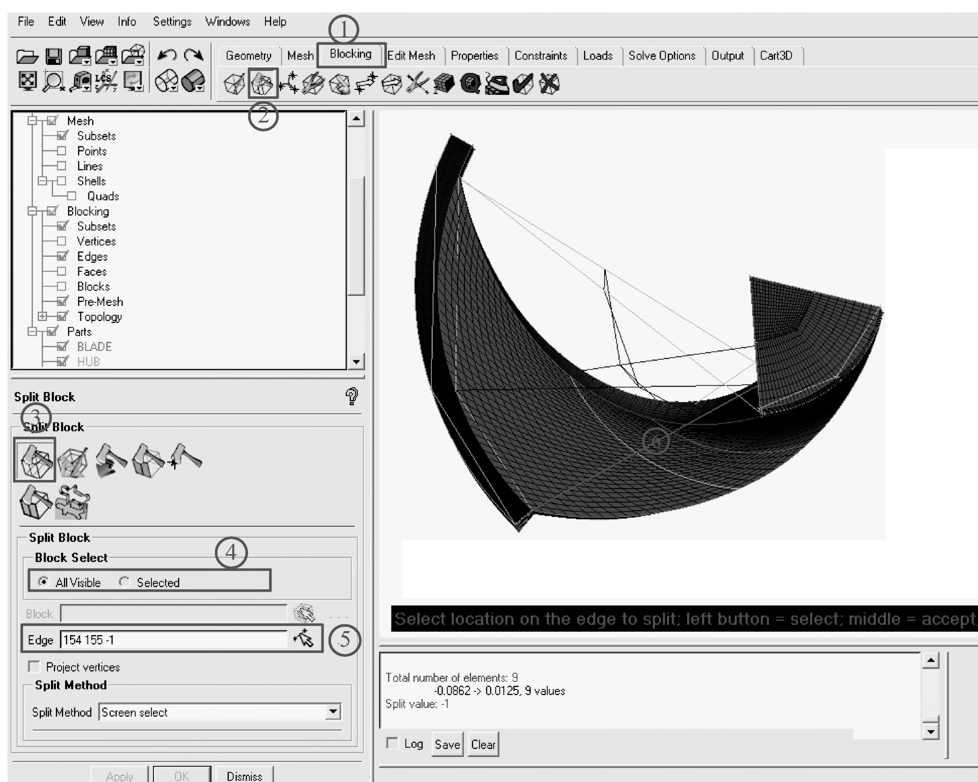


图 3-93 进一步切分叶轮拓扑结构

中勾选【All Visible】，在【Edge】单击，然后在右侧窗口中选中 Block 的边（如图中⑥下的红色线），最后单击左下侧窗口中的【Apply】按钮，完成初始拓扑结构的切分操作。

然后对叶轮拓扑进行自适应结构操作，与步骤 19）操作一致，不再赘述。生成的拓扑结构如图 3-94 所示。

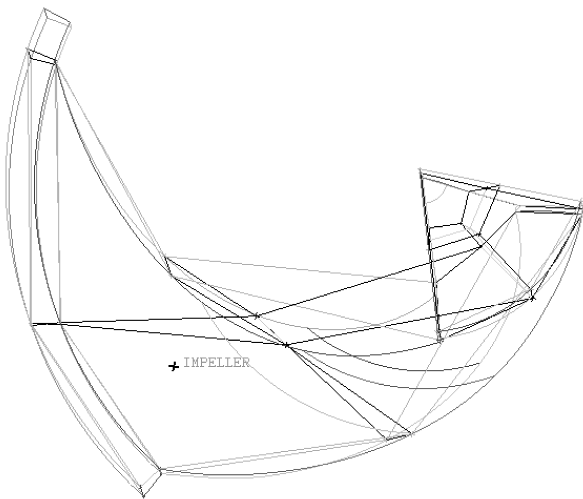


图 3-94　叶轮拓扑结构自适应

接着对叶轮主流道的中线进行手动调整，具体操作如图 3-95 所示。单击【Blocking】标签，选择【Move Vertex】，在左下侧选项栏里，单击【Move Vertex】，在下方【Method】中选择【Single】，在【Vertex】后单击，然后在右侧窗口中单击选中 Block 的节点进行拖动（如图中红色圈内的点），最后单击左下侧窗口中的【Apply】按钮。这里需多次拖动，重复生成网格和查看质量的操作，参考步骤 22），直到网格质量满足需要。调整后的拓扑结构如图 3-96 所示，生成网格的质量如图 3-97 所示。

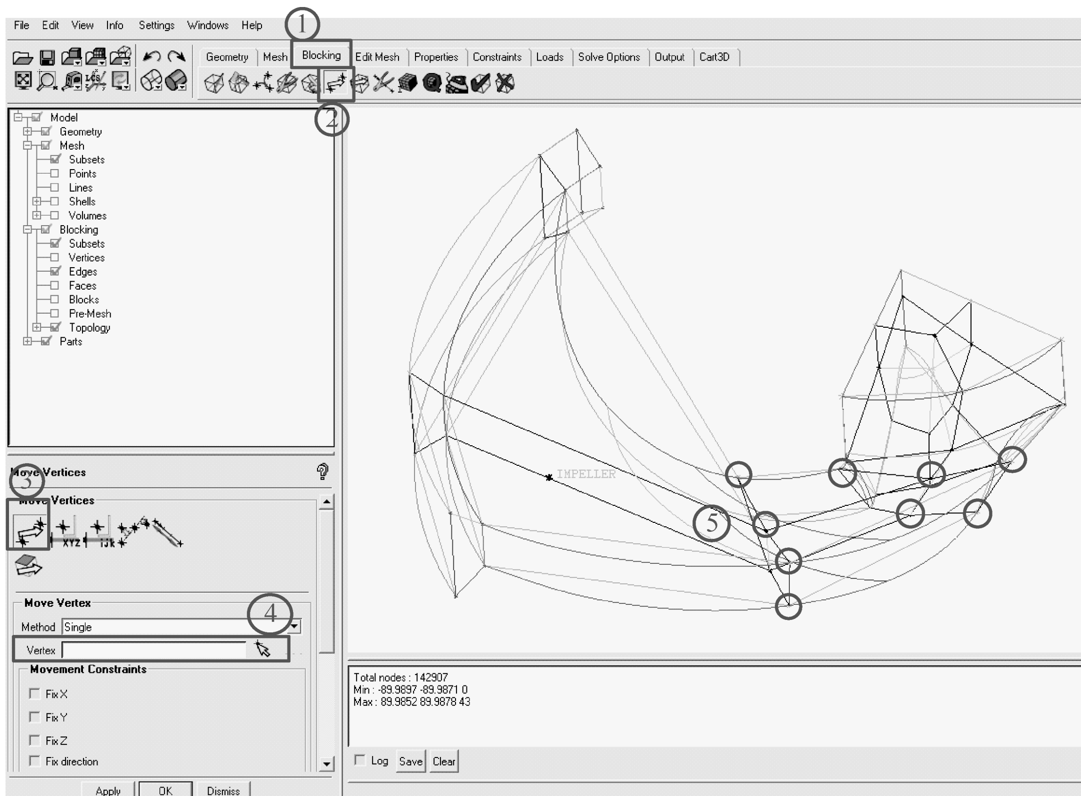


图 3-95　叶轮拓扑点手动调整

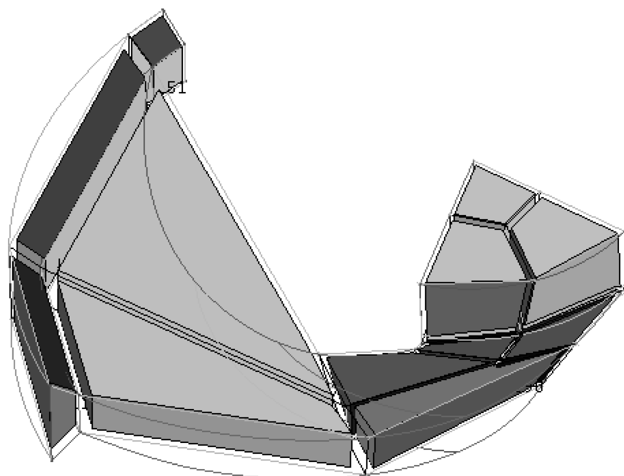


图 3-96　手动调整后的拓扑结构

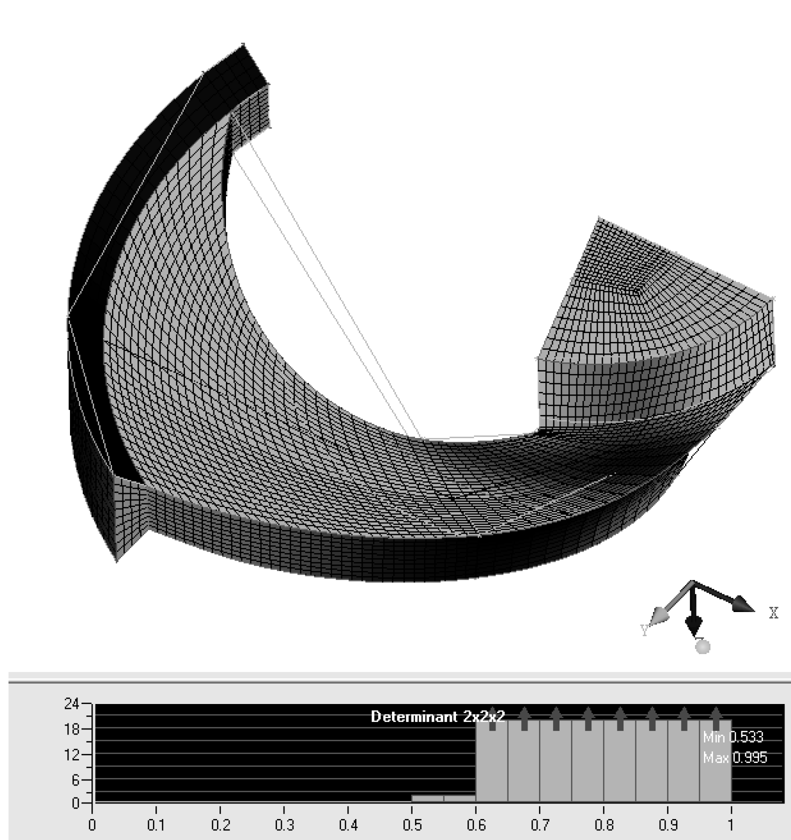


图 3-97　调整拓扑后的网格质量

22）保存网格：右键单击左上侧窗口中【Model】→【Blocking】→【Pre-Mesh】，选择【Convert to Unstruct Mesh】，如图 3-98 所示。单击【File】→【Mesh】→【Save Mesh】，保存当前的网格文件。

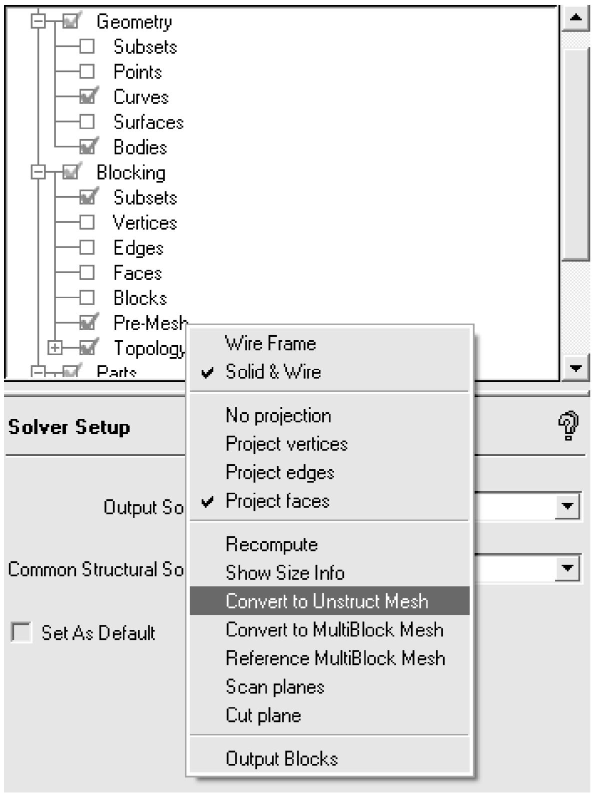


图 3-98　叶轮结构网格转换

23）网格周期复制：由于只做出了一个叶轮流道的网格，要通过周期性复制获得全流道叶轮网格。进行周期复制前，首先要确定周期面上的网格节点是一一对应的，意味着每条拓扑边长度一致，拓扑边上的点位置相同。这个操作分为两个部分，其一是调整周期面上的拓扑线长度一一对应，其二是调整周期面的拓扑线上的网格点数一一对应。

第一步的操作如图 3-99 所示。单击【Blocking】标签，选择【Move Vertex】，在左下侧选项栏里，单击【Set Edge Length】，在下方【Edges】中单击，然后在右侧窗口中单击选中周期面上的拓扑边（如图中⑤所示的两条边），在【Length】中输入长度值，最后单击左下侧窗口中的【Apply】按钮。接着对⑦、⑧、⑨、⑩和⑪所示的边定义相同的长度，操作方法相同。

第二步的操作如图 3-100 所示。单击【Blocking】标签，选择【Pre-Mesh Params】，在左下侧选项栏里，单击【Edge Params】，在下方【Edge】后中单击，然后在右侧窗口中单击选中周期面上的拓扑边，如图中⑤所示的边，在【Nodes】中输入拓扑边上的节点数，最后单击左下侧窗口中的【Apply】按钮。接着对⑦、⑧、⑨所示的边定义网格节点数，使得⑤上的节点数等于⑧，⑦上的节点数等于⑨；按照上述操作对其余周期面上的周期边进行网格节点定义，使之一一对应。

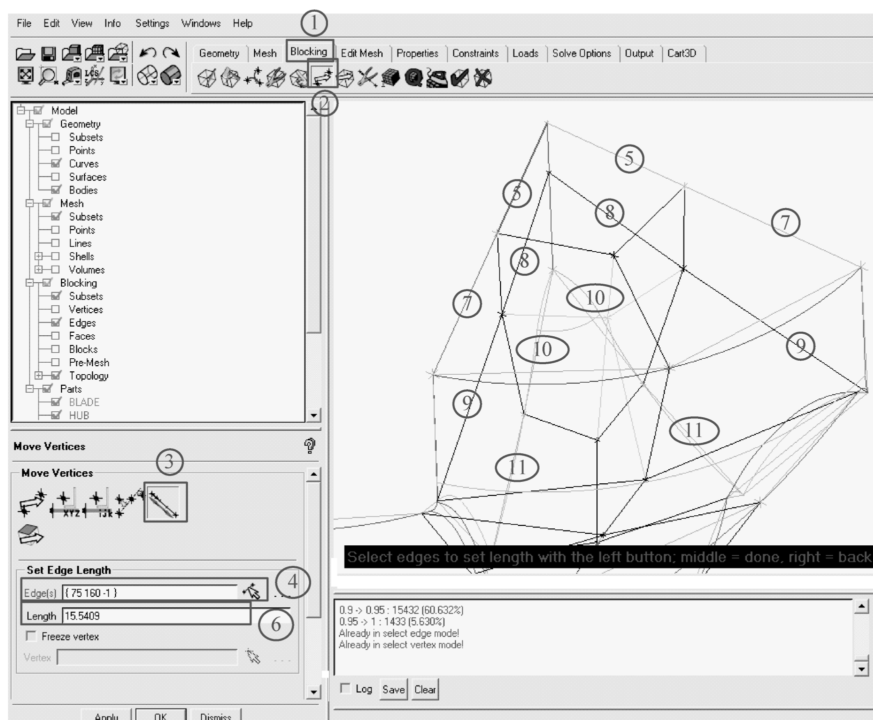


图 3-99　叶轮拓扑周期边长度定义

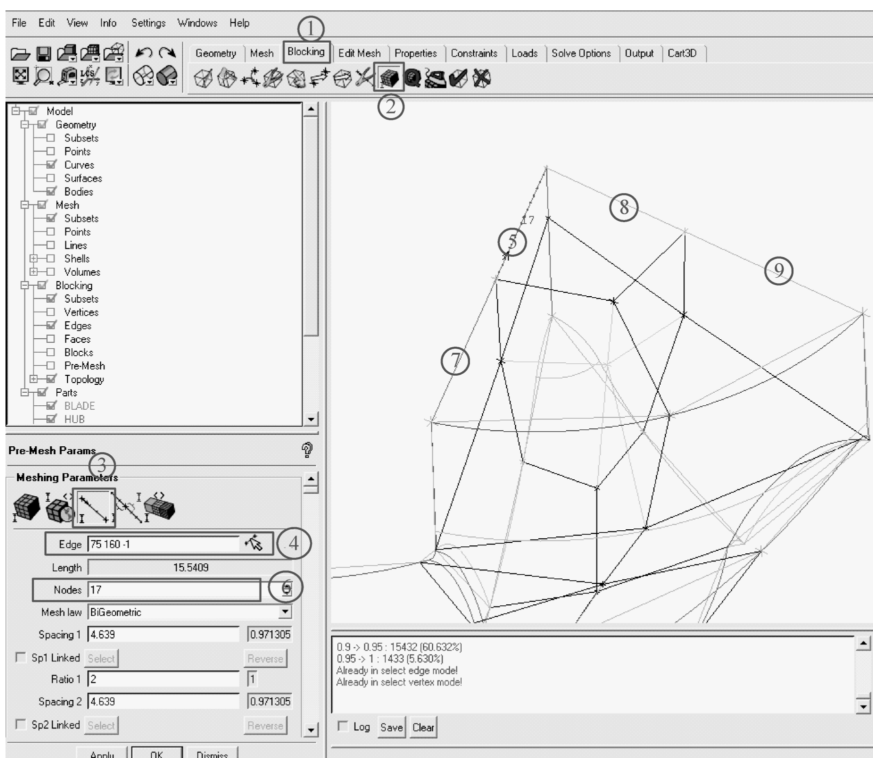


图 3-100　叶轮拓扑周期边上网格节点数定义

然后生成网格，通过勾选左上侧窗口中的【Pre-Mesh】，生成结构网格。并且右键单击左上侧窗口中【Model】→【Blocking】→【Pre-Mesh】，选择【Convert to Unstruct Mesh】。单击【File】→【Mesh】→【Save Mesh】，保存当前的网格文件。完成生成结构网格的转换。

接下来要对网格的周期面进行删除的操作，具体步骤如图 3-101 所示。单击【Edit Mesh】标签，选择【Delete Elements】，在左下侧选项栏里，单击 ，然后在右侧窗口中弹出对话框，在对话框中单击【Select items in a part】，弹出 Select part 的对话框，在内面勾选【PERIC】周期面，单击【Accept】按钮；最后单击左下侧窗口中的【Apply】按钮，完成叶轮周期面网格的删除操作。删除周期面网格的单流道叶轮网格如图 3-102 所示。

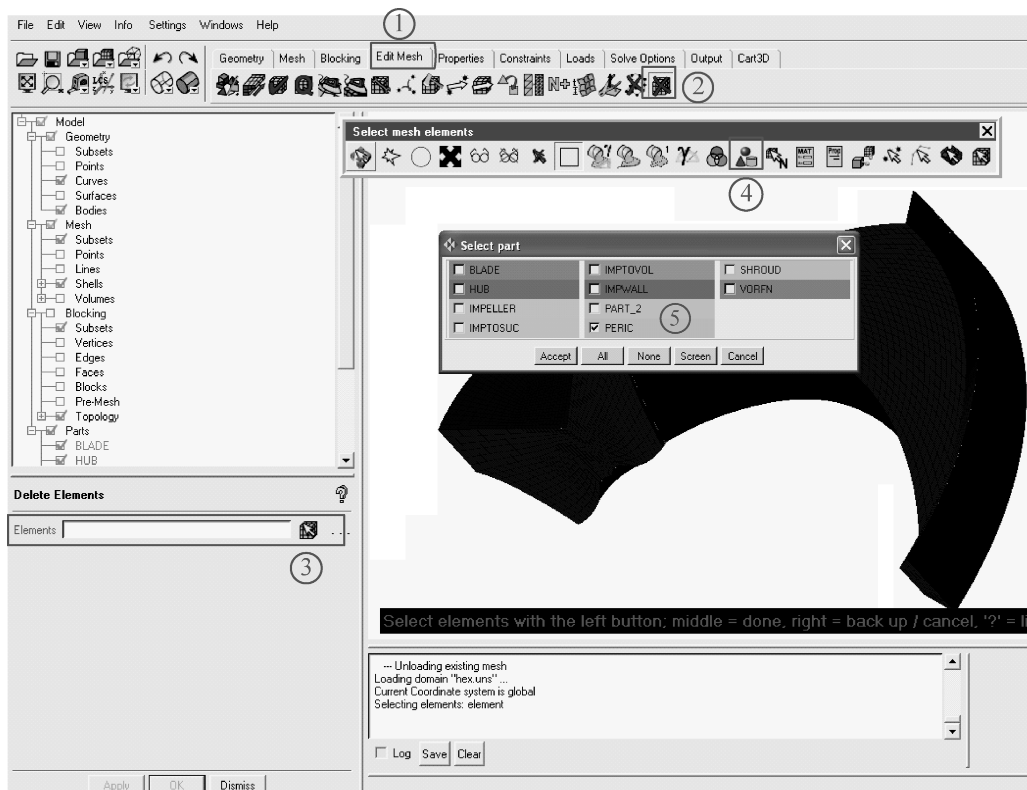


图 3-101　叶轮拓扑周期面网格删除

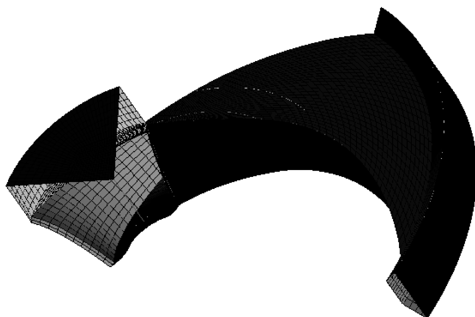


图 3-102　删除周期面网格的叶轮单流道网格

最后对叶轮单流道的网格进行旋转复制，具体操作如图 3-103 所示。单击【Edit Mesh】标签，选择【Transform Mesh】，在左下侧选项栏里，单击 ，然后在右侧窗口中弹出 Select mesh elements 对话框，在对话框中单击【Select all appreciate objects】；然后在左下侧的窗口中，单击【Rotate Mesh】，并且勾选下方的【Copy】，且在【Number of copies】输入框中输入叶片的个数，本例中为 5，然后再勾选下方的【Merge nodes】；勾选下方的【Delete duplicate elements】；在【Rotation】下方的旋转轴【Axis】中勾选旋转轴【Z】，并且在【Angle】输入框中输入周期角度，本例中为 72°（360°/5）；最后单击左下侧窗口中的【Apply】按钮，完成叶轮单流道网格的周期复制操作。复制后的全流道网格如图 3-104 所示。

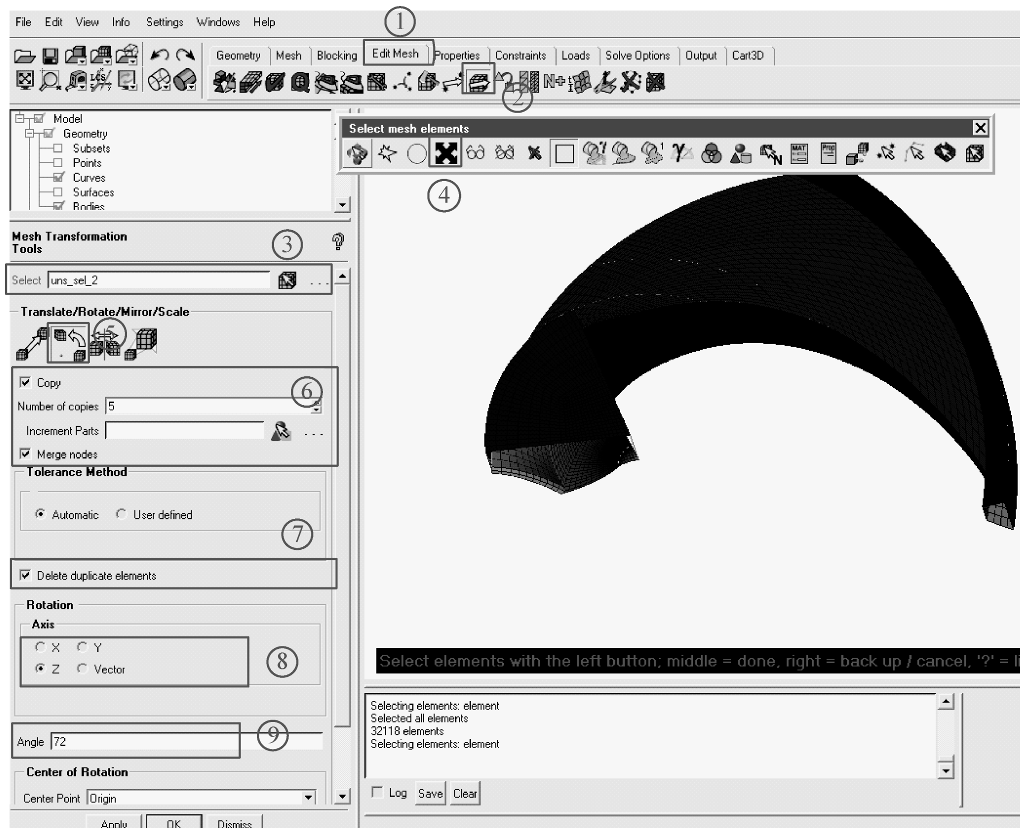


图 3-103　叶轮单流道网格的周期旋转复制

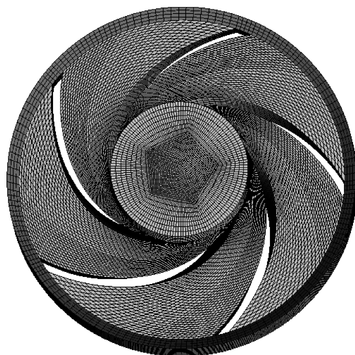


图 3-104　叶轮全流道网格

24）导出计算网格文件。不同的求解器需要不同的输出格式，图 3-105 为 CFX 求解器所需的网格文件格式。单击【Output】标签，选择【Select Solver】，弹出左下侧的选项栏，在选项【Output Solver】中选中 ANSYS CFX。然后单击【Output】→【Write input】，弹出如图所示的对话框，修改导出计算网格文件的名称，单击【Done】按钮，导出 CFX 计算所需的 cfx5 网格文件。

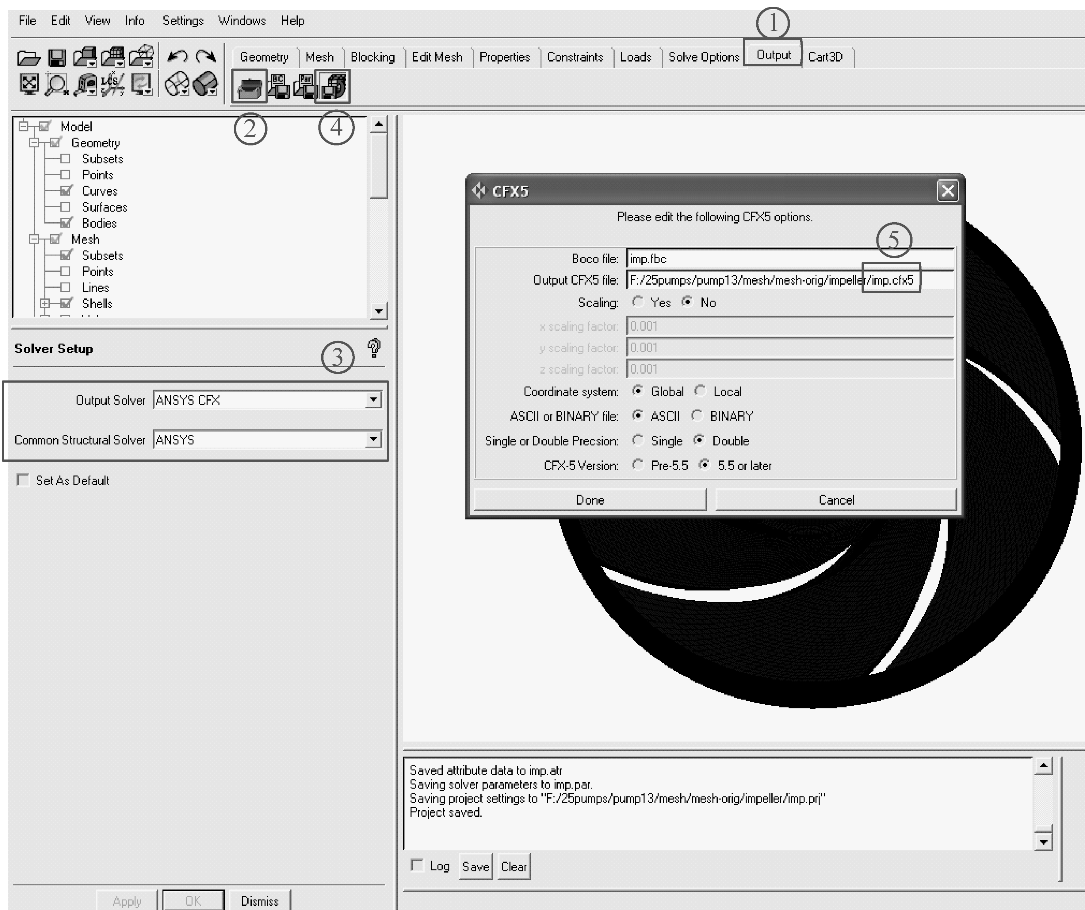


图 3-105　导出计算网格文件

3.3.2　蜗壳结构化网格划分

蜗壳结构化网格创建与蜗壳非结构化网格创建方法相同。

1）打开 ICEM，创建工作目录。

2）新建文件分别为 VOLUTE. prj。

3）导入 stp 格式的几何文件。

4）保留蜗壳几何体。

5）自动创建几何拓扑。

6）创建体，体命名为 volute。

以上步骤与叶轮结构化网格步骤划分类似，此处不再重复，具体参见上节内容。

7）创建 Part，蜗壳需要创建交界面和壁面。蜗壳交界面有两个，一个是与出口延长段相交的面，命名为 vol_ckyc，另一个是与叶轮相交的面，命名为 vol_imp；所有壁面定义为 wall_volute。

8）合并碎面，从而删除碎线：蜗壳结构化网格创建结果如图 3-106 所示。

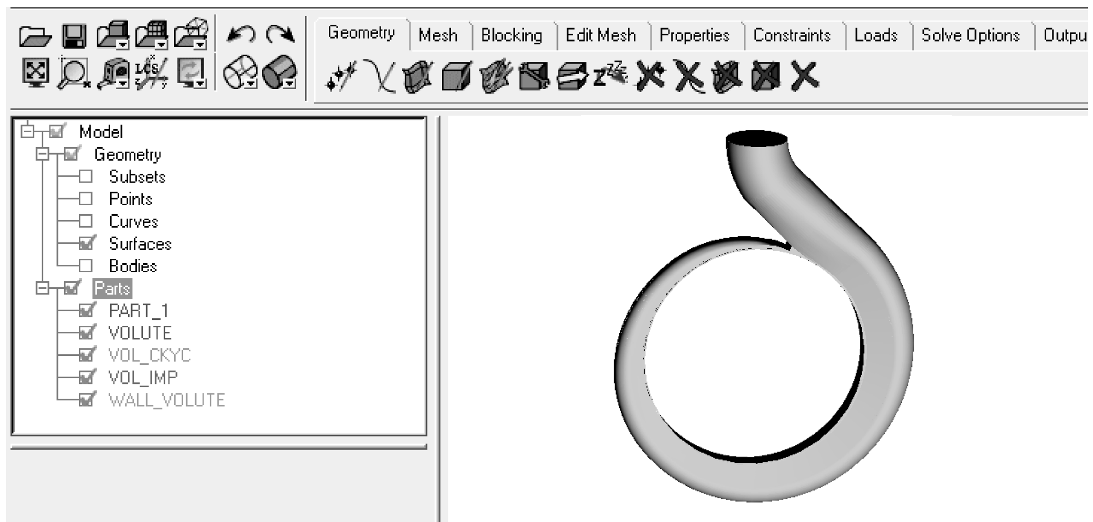


图 3-106　蜗壳结构化网格创建

9）创建局部 Block：单击【Blocking】→【Create Block】→【Initialize Blocks】，关闭几何工具栏中的切换点、切换面、切换体，使用切换曲线来生成 Block；选取图 3-107 中所示黑线，单击鼠标中键或单击【Apply】按钮，完成局部 Block 创建。

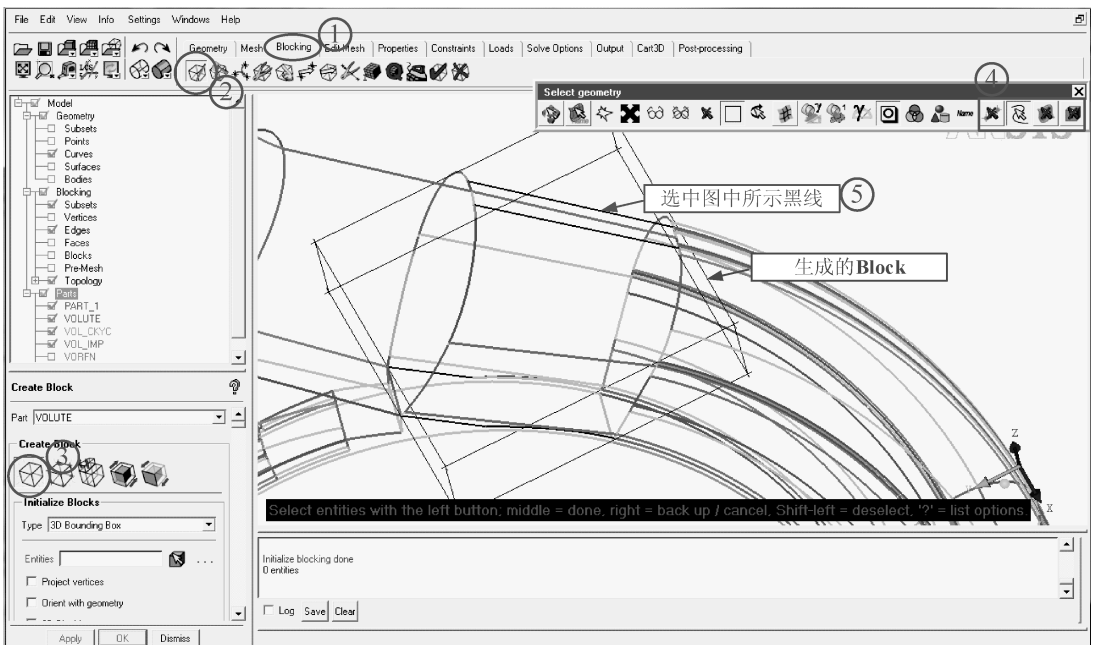


图 3-107　局部 Block 生成步骤

将生成的 Block 线关联到几何体曲线上，单击【Blocking】→【Associate】→【Associate Edge to Curve】。选择 Associate Edges，单击鼠标中键确定，选择 Associate Curves，单击【Apply】按钮或鼠标中键，完成 Block 线与曲线的关联，关联步骤如图 3-108 所示，关联结果如图 3-109 所示。

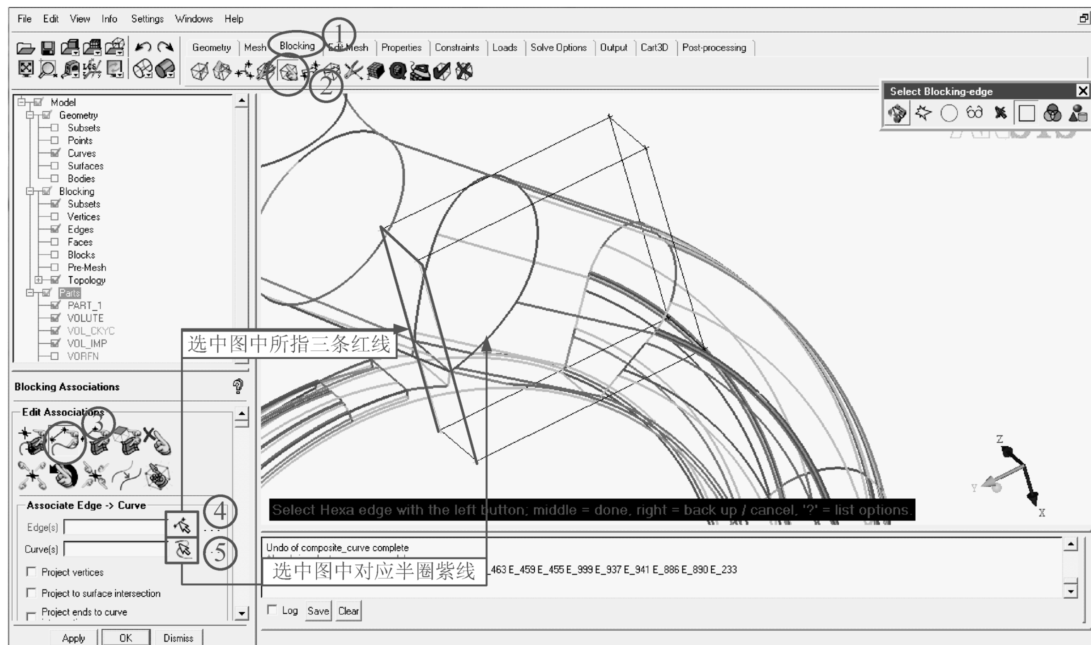


图 3-108　局部 Block 线关联到几何体曲线步骤

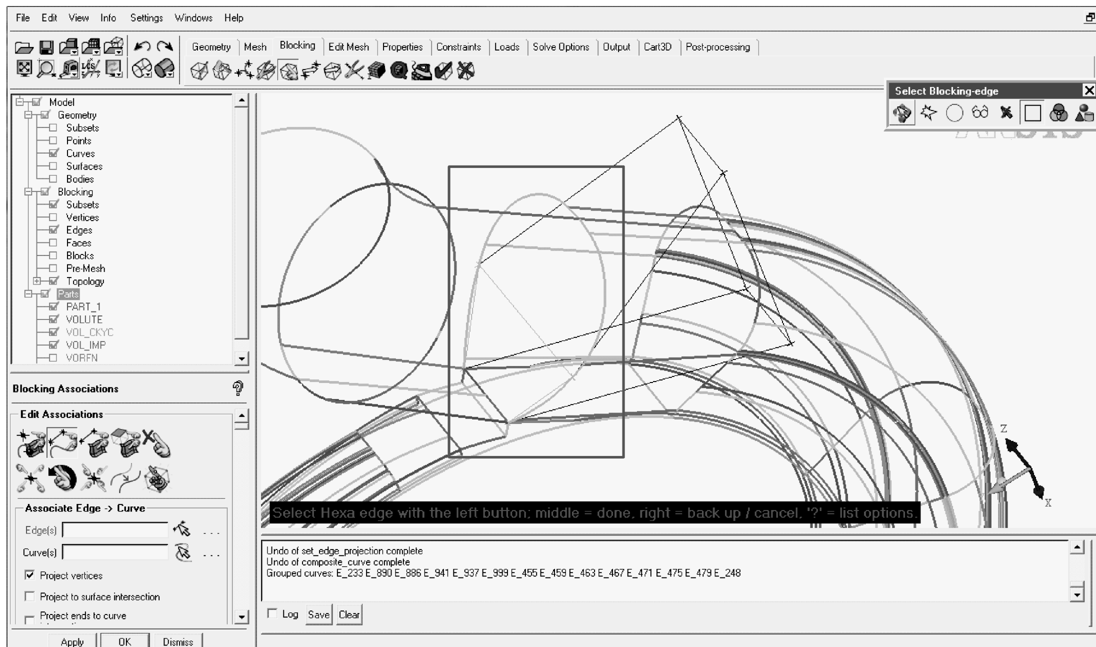


图 3-109　局部 Block 线关联到几何体曲线结果

将 Block 对面的线关联到几何体另一个曲线上，关联结果如图 3-110 所示。

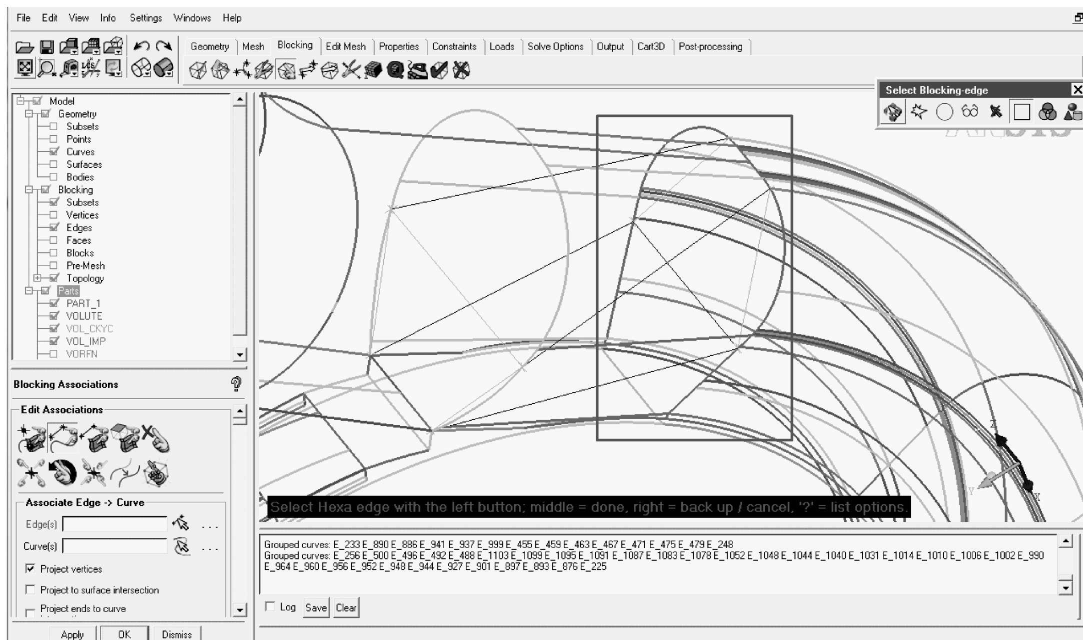


图 3-110 Block 线完全关联到几何体曲面结果

挪动 Block 节点到合适位置，单击【Blocking】→【Move Vertex】；移动方法选择 Single，Vertex 选取后，单击【Apply】按钮，完成 Block 点的移动，如图 3-111 所示。

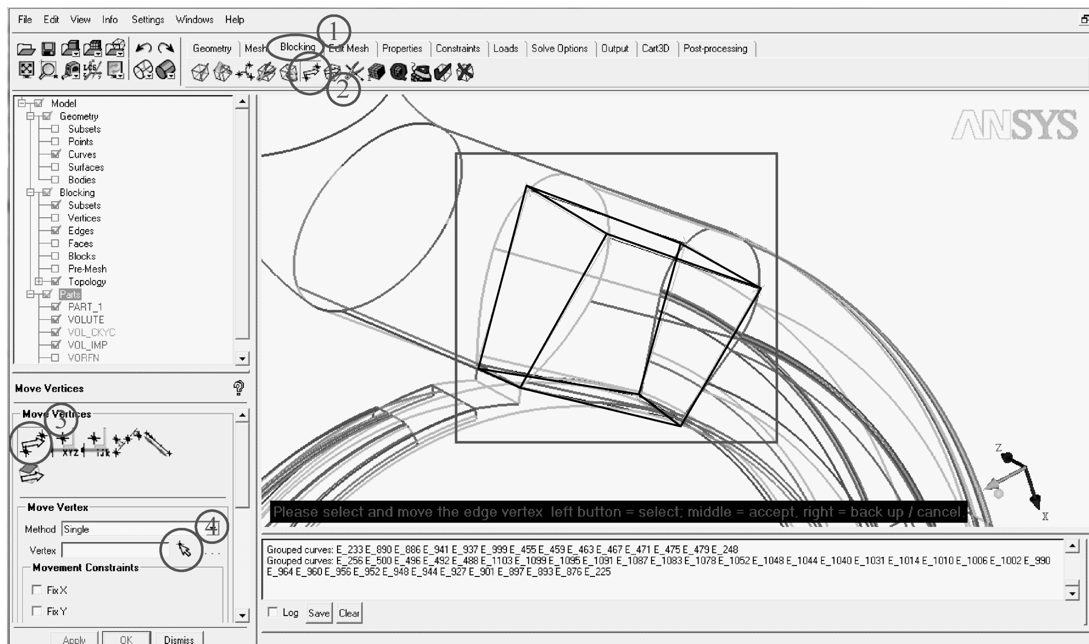


图 3-111 挪动 Block 节点到合适位置

10）创建隔舌部分 Block。按照隔舌部分位置切割上面得到的 Block，单击【Blocking】→【Split Block】→【Split Block】，在对应隔舌的位置处左键单击，定义切割的位置，单击鼠标中键确定，如图 3-112 所示。

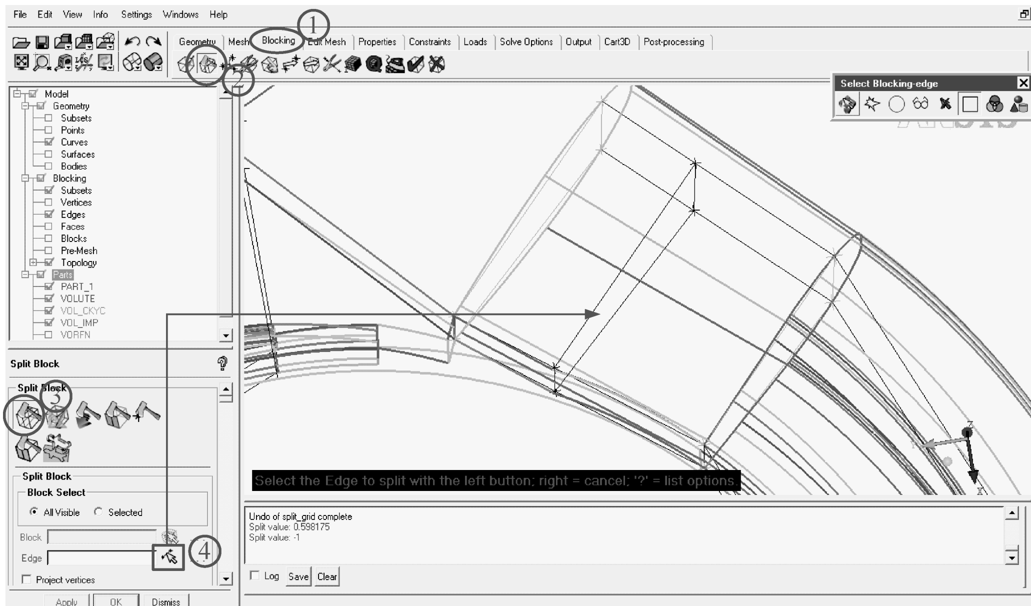


图 3-112　切割 Block

运用根据拉伸距离确定拉伸面的功能生成小 Block 块，单击【Blocking】→【Create Block】→【Extrude Face】；Method 选择 Fixed distance；面选择 Block 拉伸面，距离设置为 15；单击【Apply】按钮或鼠标中键完成新创建的 Block，创建步骤及结果如图 3-113 所示。

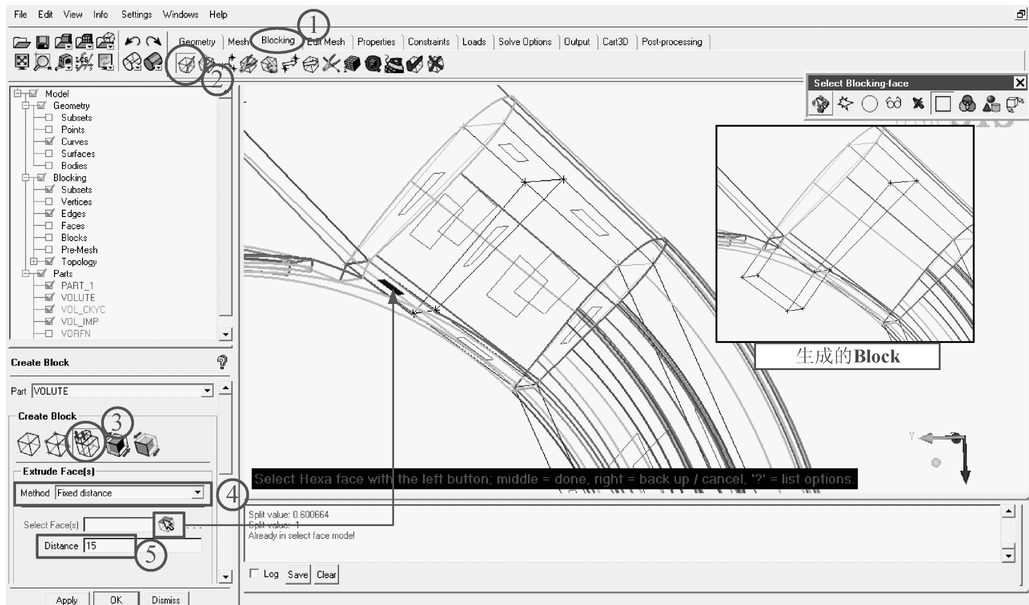


图 3-113　根据拉伸距离确定拉伸面创建 Block

做辅助点以确定 Block 与隔舌处关联位置，单击【Geometry】→【Create Point】→【Project Point to Curve】；Curve 选取一条线，单击鼠标中键确定，选择线对应的 Point，并单击中键确定，同样方法做另一个辅助点；单击【Apply】按钮完成蜗壳隔舌处辅助点创建，如图 3-114 所示。

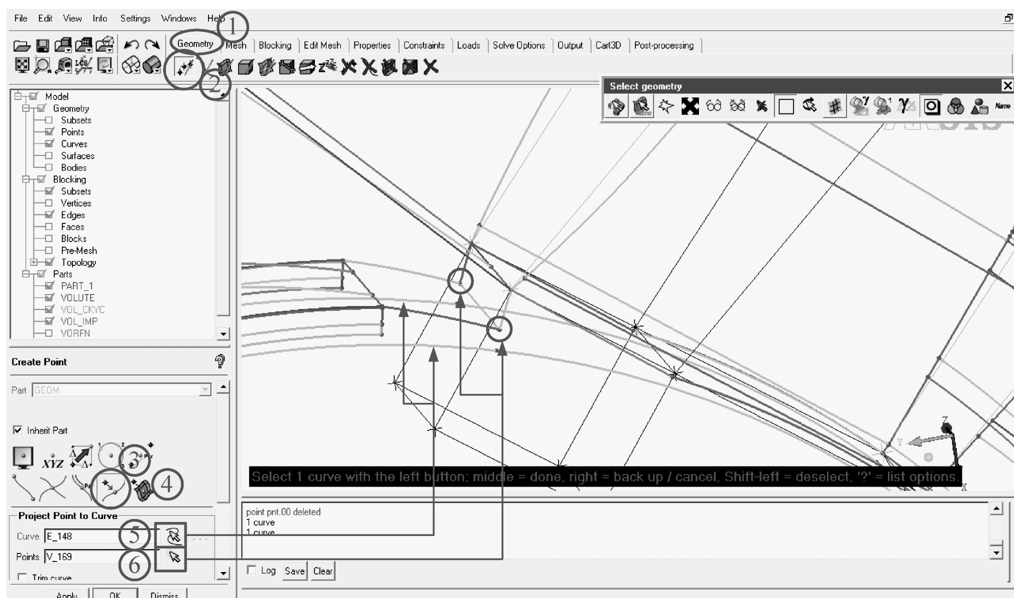


图 3-114　创建蜗壳隔舌处辅助点

将生成的 Block 以点进行关联，单击【Blocking】→【Associate】→【Associate Vertex】；选择 Block 上需要关联的点与蜗壳隔舌处关联位置，单击鼠标中键确定；单击【Apply】按钮或鼠标中键，通过点完成 Block 与几何模型的关联，关联步骤及结果如图 3-115 所示。

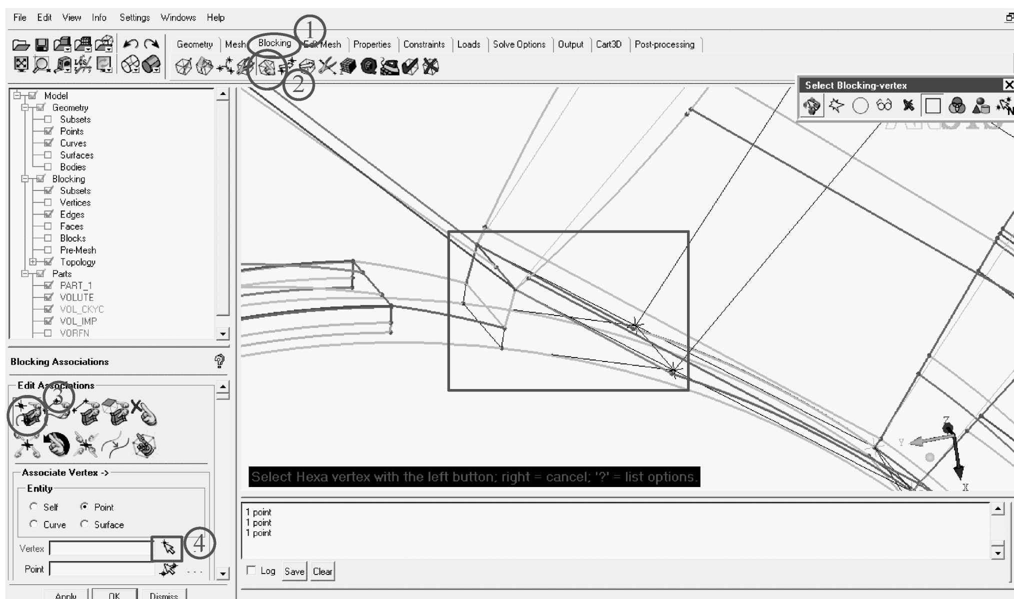


图 3-115　通过点进行 Block 与几何模型的关联

11）创建蜗壳壳体部分 Block：利用沿曲线拉伸面的功能继续创建新的 Block，单击【Blocking】→【Create Block】→【Extrude Face】；【Method】选择 Extrude Along Curve；分别选择 Block 拉伸面，拉伸所沿曲线及结束拉伸时对应的点；单击【Apply】按钮或鼠标中键完成新创建的 Block，创建步骤如图 3-116 所示，创建结果如图 3-117 所示。

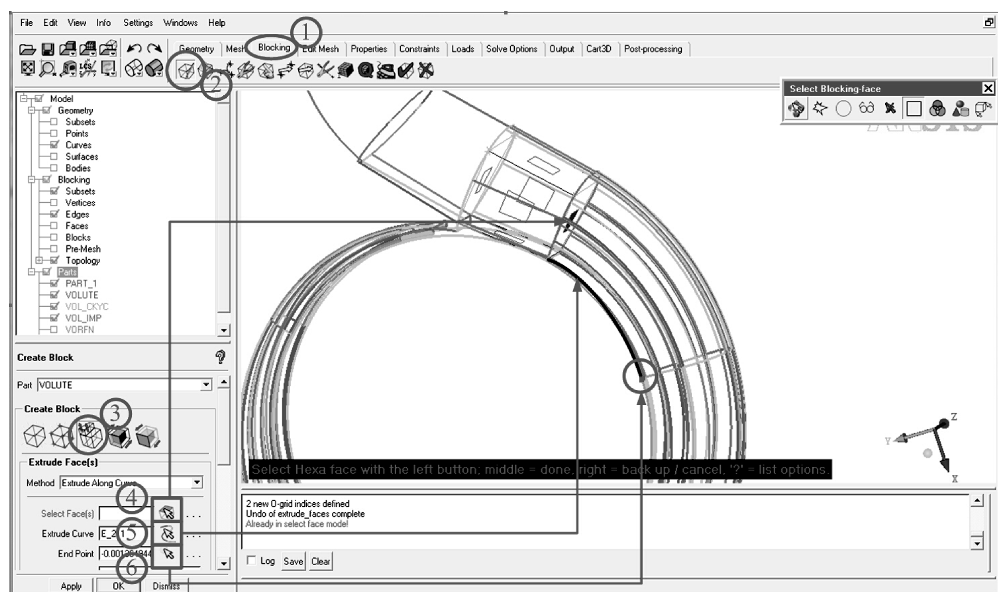


图 3-116　利用沿曲线拉伸面的功能创建 Block 步骤

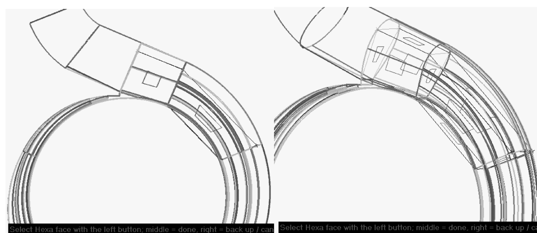


图 3-117　利用沿曲线拉伸面的功能创建 Block 结果（1）

相同方法继续创建蜗壳体 Block，结果如图 3-118 所示。

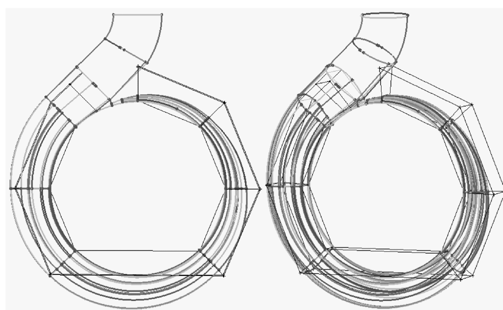


图 3-118　利用沿曲线拉伸面的功能创建 Block 结果（2）

12）合并蜗壳壳体及隔舌部分 Block：在蜗壳壳体靠近隔舌处，根据拉伸距离确定拉伸面的功能生成小 Block，将两个 Block 对应节点进行合并。单击【Blocking】→【Merge Vertices】→【Merge Vertices】；先选择一个蜗壳隔舌处 Block 节点（蓝色）作为不动的参照点，再选择蜗壳壳体与之对应的 Block 节点，单击鼠标中键确定合并；合并另外三个节点；单击【Apply】按钮完成合并，合并步骤及结果如图 3-119 所示。

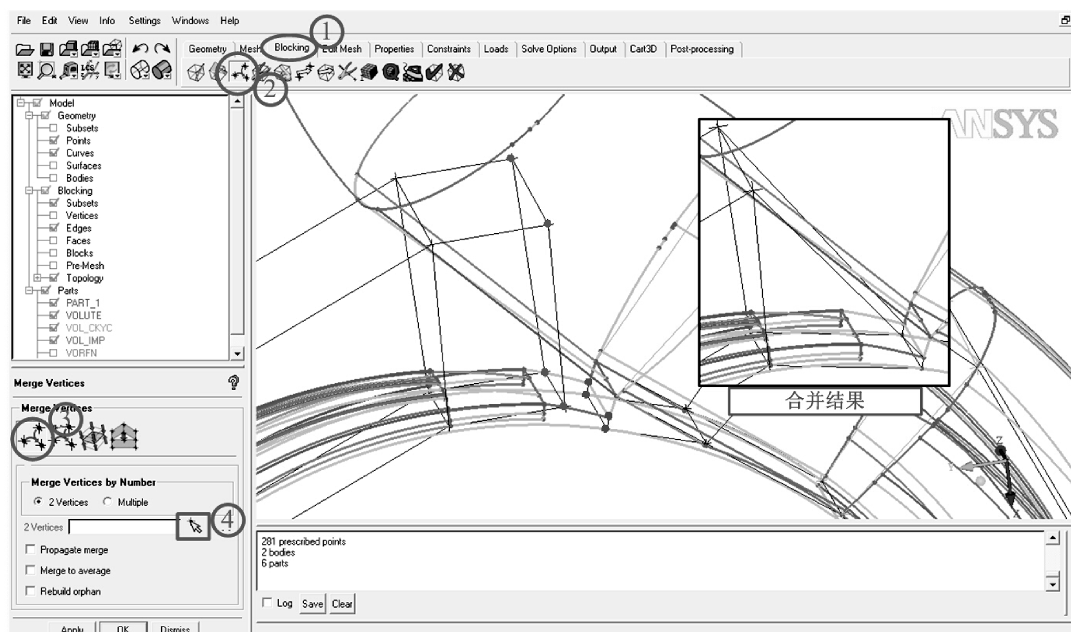


图 3-119　节点合并

根据基圆，对蜗壳壳体与 Block 进行关联，如图 3-120 所示。

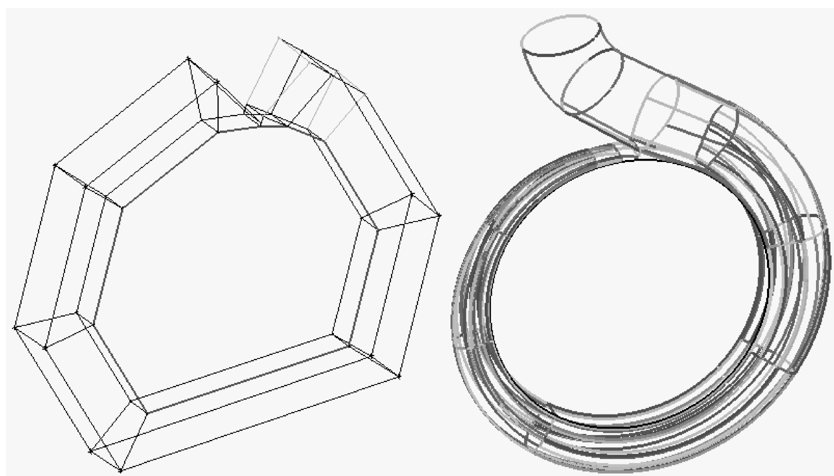


图 3-120　关联 Block 与壳体基圆

根据截面，对蜗壳壳体与 Block 进行关联，如图 3-121 所示。

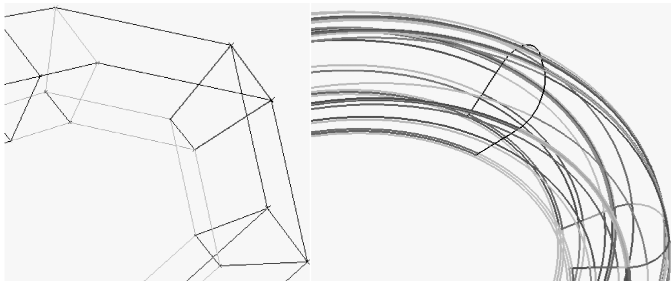


图 3-121　关联 Block 与壳体截面

13）创建蜗壳出口部分 Block：运用根据拉伸距离确定拉伸面的功能生成小 Block，单击【Blocking】→【Create　Block】→【Extrude Face】；【Method】选择 Fixed distance；面选择 Block 拉伸面，距离设置分别为 40、30；单击【Apply】按钮或鼠标中键完成新创建的两个 Block。利用前面所介绍的详细方法对蜗壳出口与两个 Block 进行关联，并调整移动节点位置。创建及关联结果如图 3-122 所示。

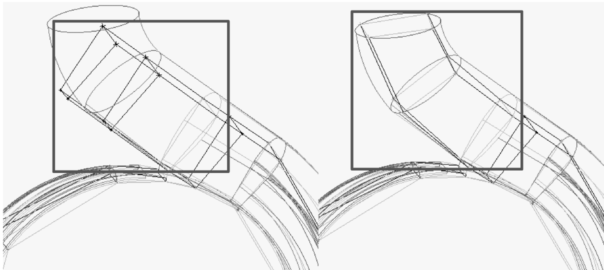


图 3-122　创建蜗壳出口 Block

14）赋予面网格尺寸：如图 3-123 所示。单击【Mesh】标签，选择【Surface Mesh Set-up】，在左侧选项栏里，【Surfaces】选取为全部表面，在【Maximum Size】输入框里输入 2，单击【Apply】按钮，完成面网格尺寸赋值。

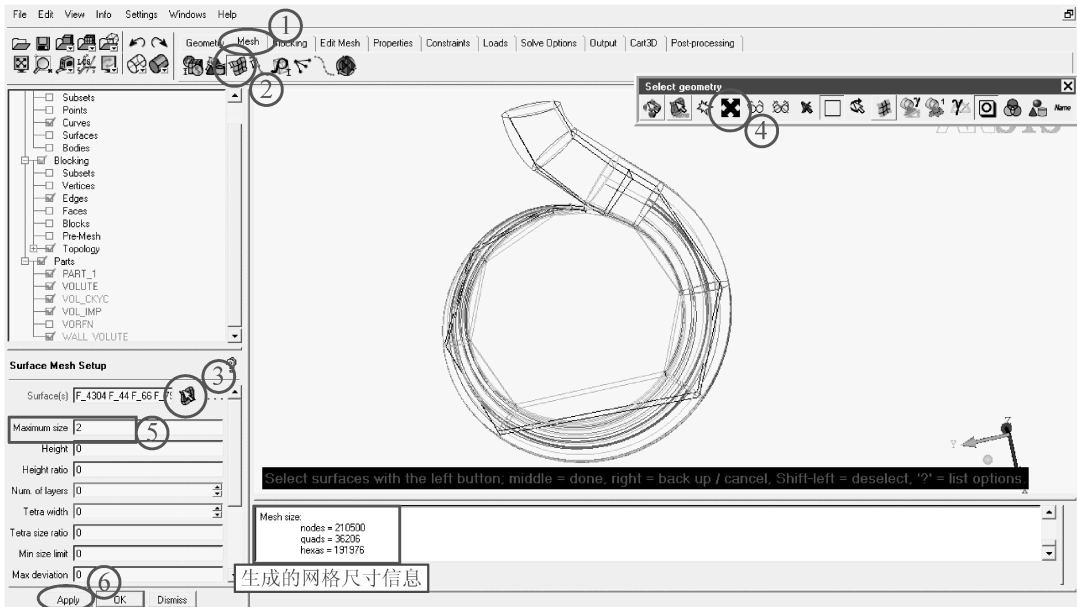


图 3-123　面网格尺寸定义

15）预览网格：在定义或修改了单元尺寸后，在预览网格之前，需要对块进行更新，如图 3-124 所示。单击【Blocking】→【Pre-Mesh Params】→【Update Sizes】，在左侧选项栏 Method 里选择 Update All；单击【Apply】按钮，完成块更新。在模型树中选上【Pre-Mesh】选项，弹出单击【Yes】按钮，可以预览生成的网格。查看预览网格，对不理想网格处进行 Block 修整，如图 3-125 所示。

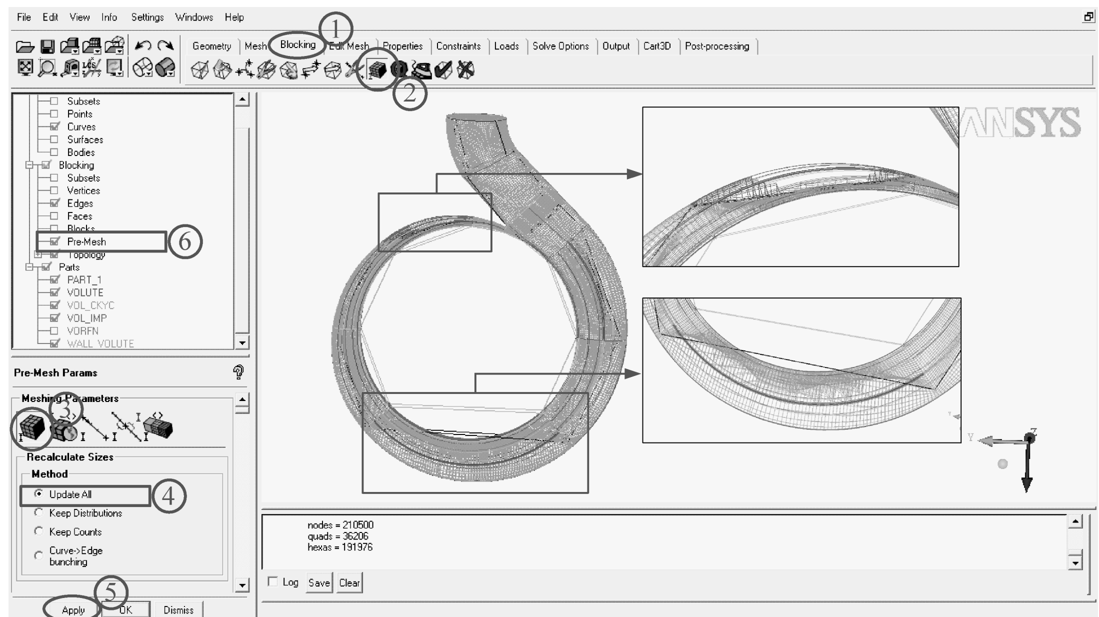


图 3-124　更新及预览网格

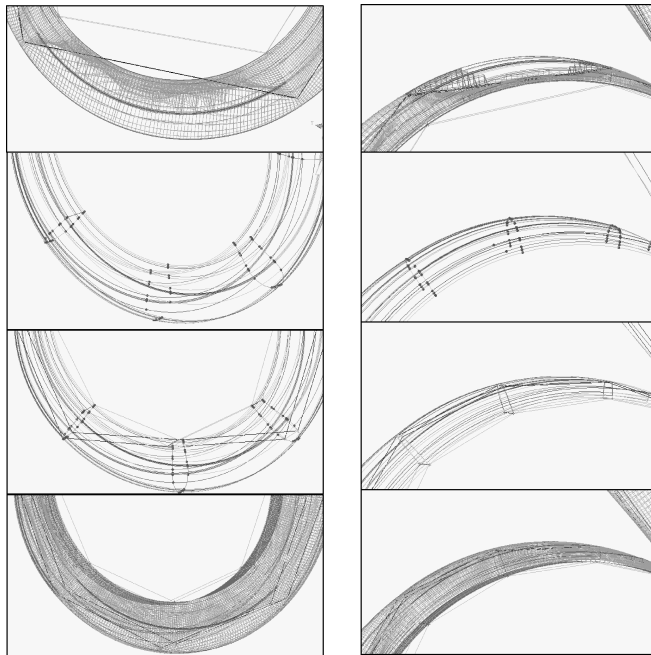


图 3-125　Block 修整

16）Block 修整：针对图 3-124 圈出的两处网格不理想状态进行修整，修整步骤包括做辅助点，将辅助点连线，切割 Block，将新切割 Block 与辅助线进行关联，并移动节点到合适的位置即完成该两处 Block 的修整，过程及结果如图 3-125 所示。

17）将蜗壳壳体 Block 线进行近似处理：如图 3-126 所示。单击【Blocking】→【Edit Edge】→【Link Edges】；选择图中所标注红线 1，再选中蓝线 2，单击鼠标中键确定；同样方法完成蜗壳壳体一圈的近似处理，近似后的结果如图 3-126 中右侧图所示。预览网格，近似前后网格如图 3-127 所示。不断修整网格，最终网格质量在 0. 2 以上。

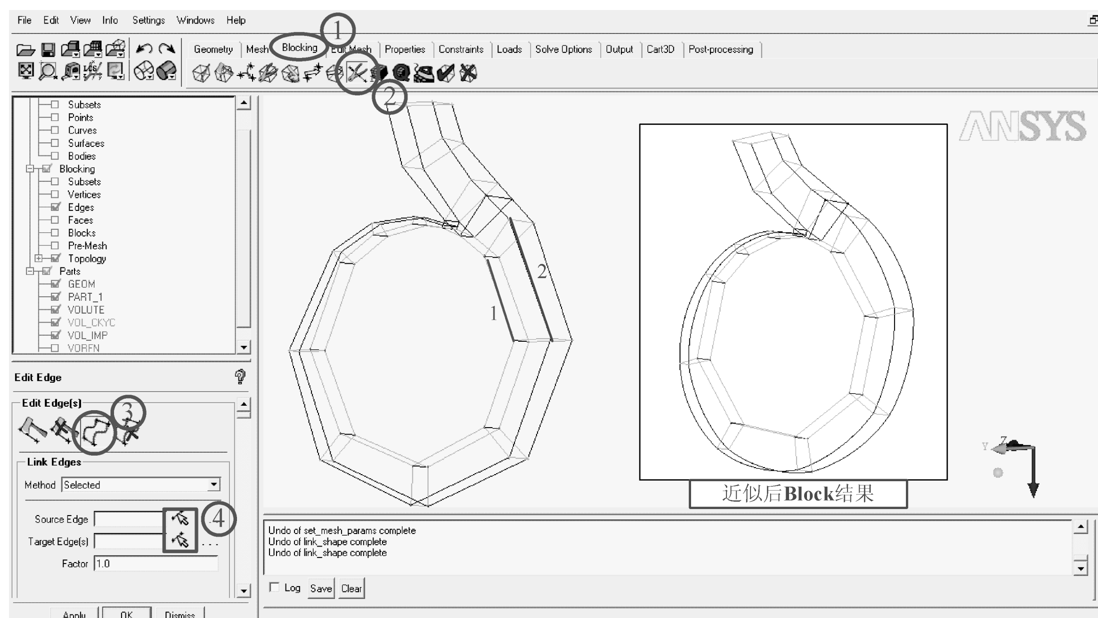


图 3-126　蜗壳壳体 Block 近似处理

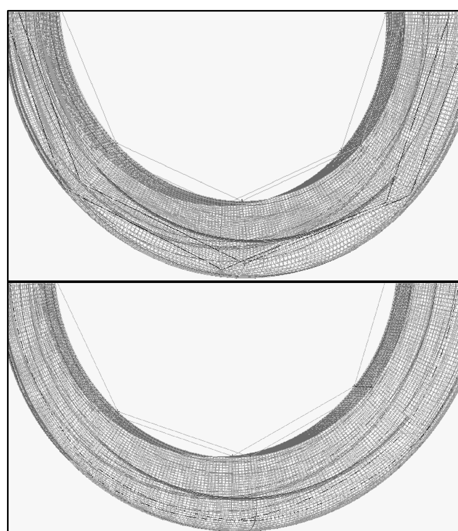


图 3-127　蜗壳壳体 Block 近似前后网格预览对比（上图为近似修整前，下图为近似修整后）

18）生成网格：在网格预览后真正生成网格，单击【File】→【Mesh】→【Load from Blocking】，如图 3-128 所示。

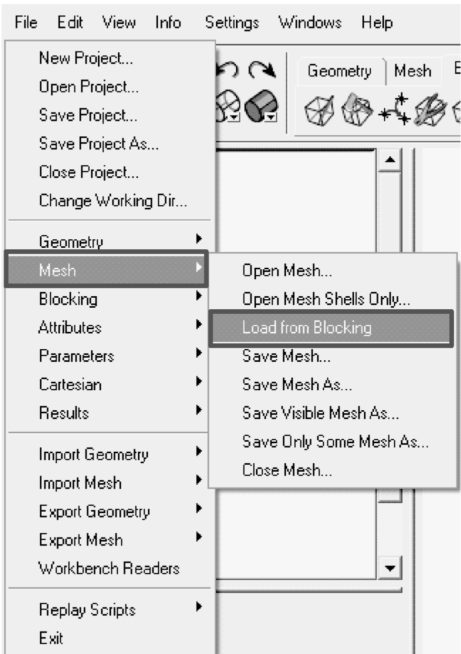


图 3-128　蜗壳结构化网格生成

19）导出计算网格文件。导出方法与叶轮结构化网格相同，具体参见图 3-105。

3.3.3　进出口延长段结构化网格划分

进出口延长段结构化网格划分与蜗壳非结构化网格划分方法相同，下面仅以进口延长段的结构化网格划分方法为例，出口延长段的划分方法与其类似。

1）打开 ICEM，创建工作目录。

2）新建文件分别为 INLET. prj。

3）导入 stp 格式的几何文件。

4）保留进口延长段（出口延长段）几何体。

5）自动创建几何拓扑。

6）创建体，体命名为 in_water（out_water）。

7）创建 Part，即定义边界面、交界面以及壁面。右键单击【Parts】，再选择【Create Part】命令，如图 3-129 所示。

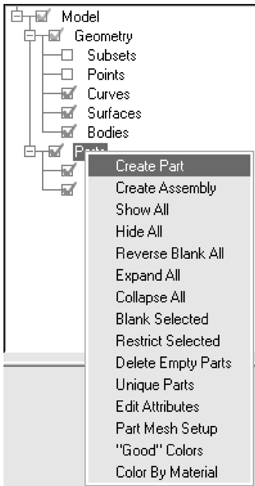


图 3-129　创建 Part 选项

对于进口延长段需定义进口边界、进口延长段与叶轮的交界面以及进口延长段的壁面。定义进口 part，命名为 inlet，单击图标，选中进口面，单击【apply】按钮，创建过程及结果分别如图 3-130 和图 3-131 所示。

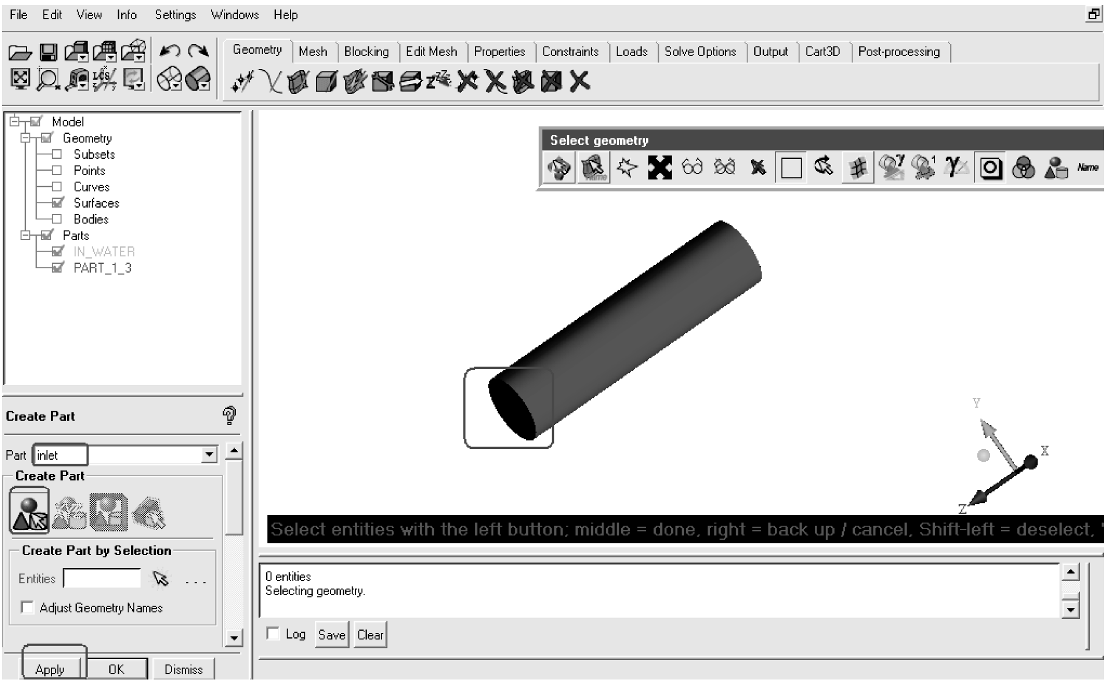


图 3-130　创建进口边界过程

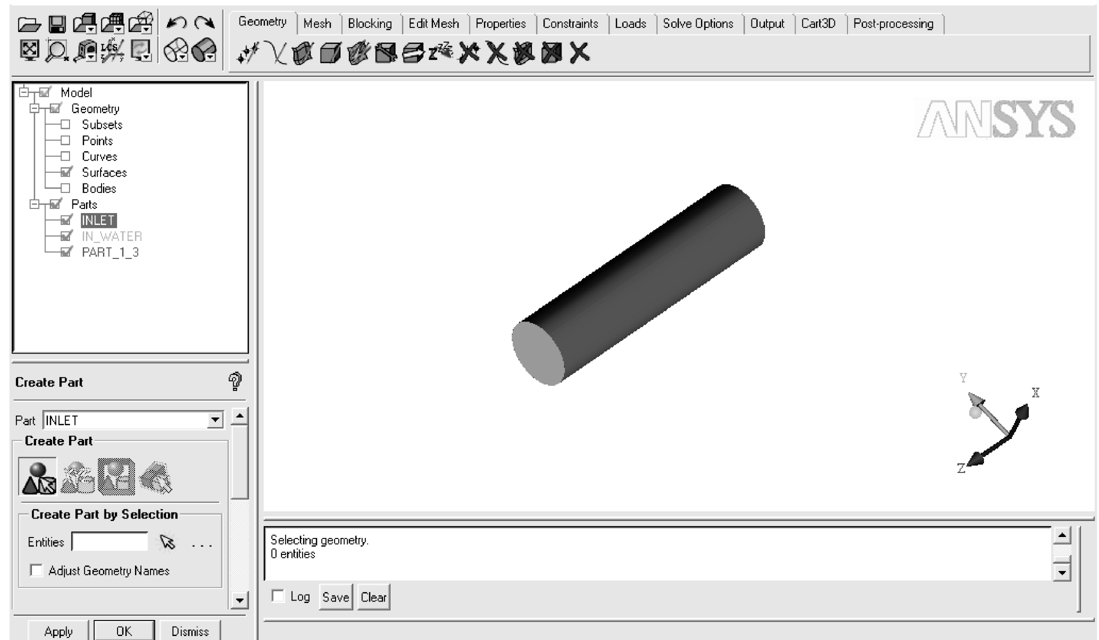


图 3-131　创建进口边界结果

采用同样的方式定义进口延长段与叶轮的交界面和进口延长段的壁面，分别命名为 jkyc_imp 和 wall_jkyc，壁面结果如图 3-132 所示。

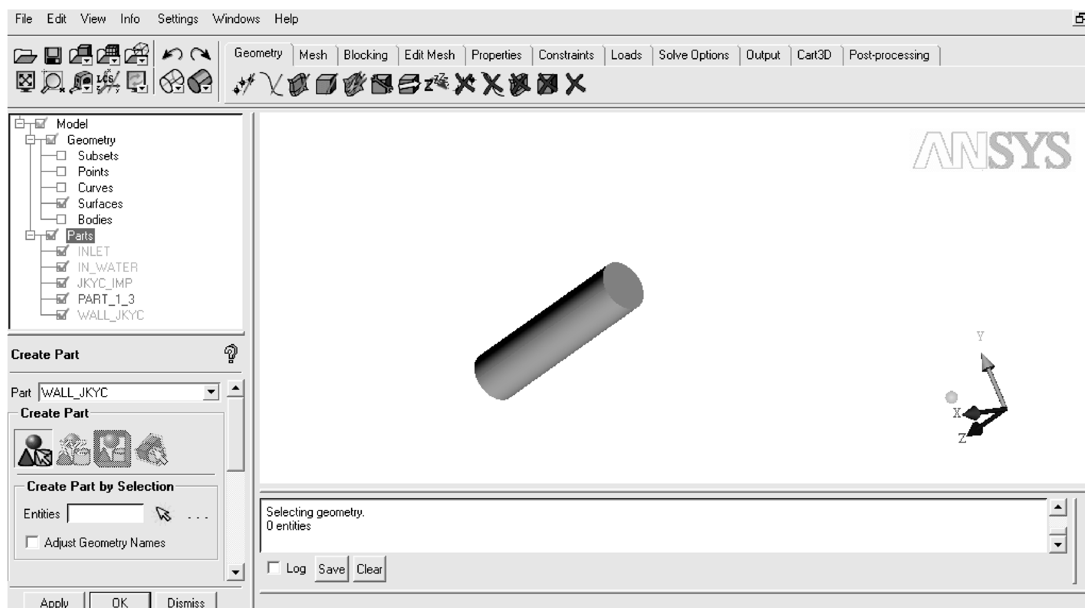


图 3-132　创建壁面结果

8）创建网格拓扑结构，如图 3-133 所示，单击【Blocking】标签，选择【Create Block】并单击，在左侧选项栏里，单击【Initialize Blocks】，然后选择下方的【Select geometry】 ，在弹出的菜单栏中单击【Select all appropriate objects】，单击【Apply】按钮，程序生成进口延长段的网格拓扑结构。

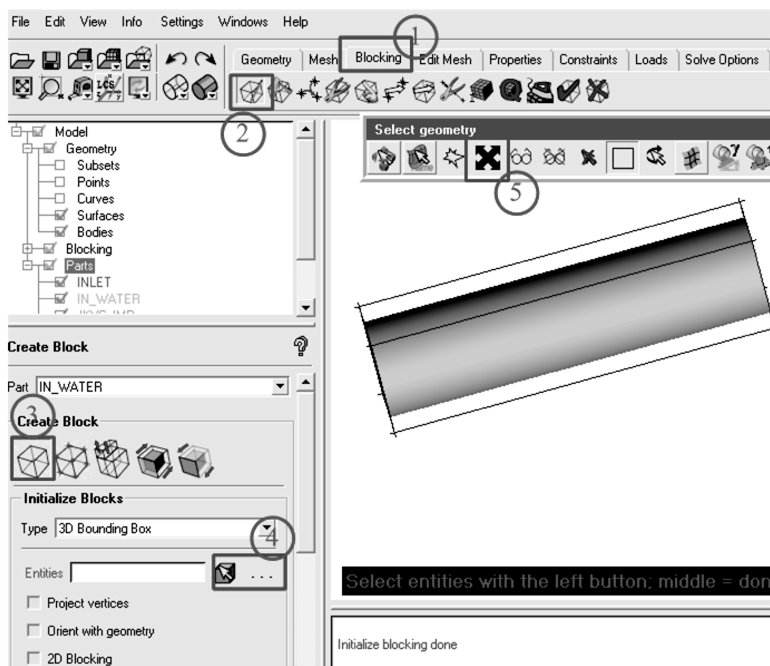


图 3-133　创建网格拓扑结构

9）创建“O”型网格：对于圆管结构，“O”型网格可以提高网格质量，并有利于生成边界层。设置“O”型网格的生成方法，如图 3-134 所示。单击【Blocking】标签，选择【Split Block】，在左侧选项栏里，单击【Ogrid Block】，然后选择下方的【Select Blocks】，并单击其后的按钮，在右侧窗口中单击绿色的 Block，单击鼠标中键或左侧窗口的【Apply】按钮；接着选择【Select Face（s）】，并单击其后，在右侧窗口中选中 jkyc_imp 和 inlet 两个表面，选中后的状态为蓝色，如图 3-134 所示；默认“O”型网格的 Offset 值为 1（可以根据实际需要进行适当调整），单击【Apply】按钮，程序生成进口延长段的“O”型网格拓扑结构，如图 3-135 所示。

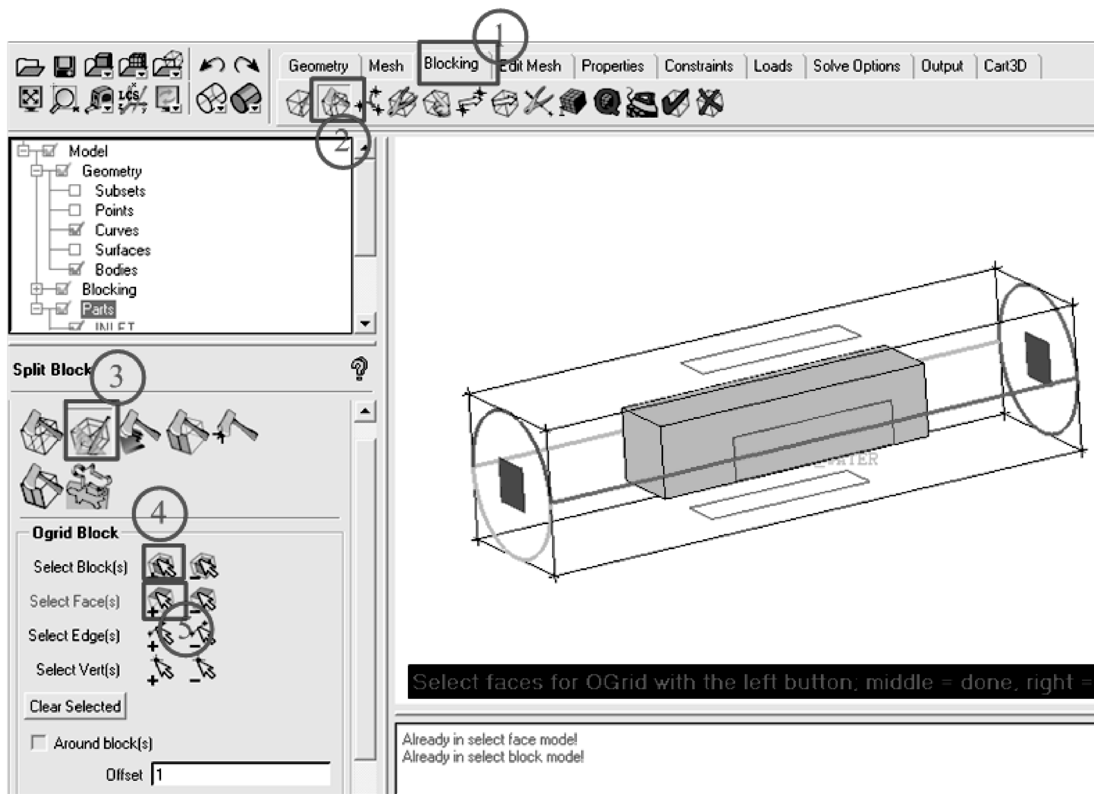


图 3-134　创建“O”型网格过程

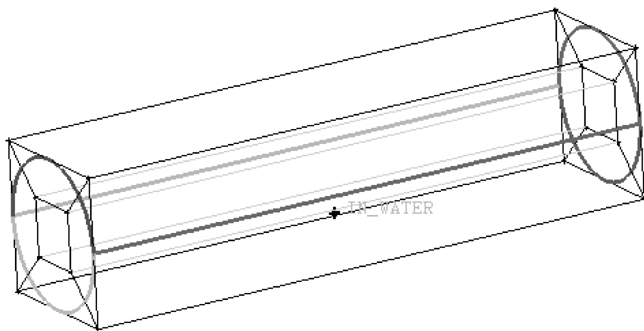


图 3-135　“O”型网格

10）关联拓扑结构：这一步是将拓扑结构与进口延长段的边线进行关联；拓扑关联方法，如图 3-136 所示。单击【Blocking】标签，选择【Associate】，在左侧选项栏里，单击【Associate Edge to Curve】，然后选择下方的【Edges】并单击，在右侧窗口中选中拓扑的边，如图 3-136 红色的拓扑边线，然后单击鼠标中键或左侧选项卡中的【Apply】按钮；接着选择【Curves】并单击其后的按钮，在右侧窗口中选中 inlet 表面的边界线，单击【Apply】按钮，程序将 inlet 表面的边界与拓扑边界线进行关联。同样，对 jkyc_imp 表面的边界进行关联。

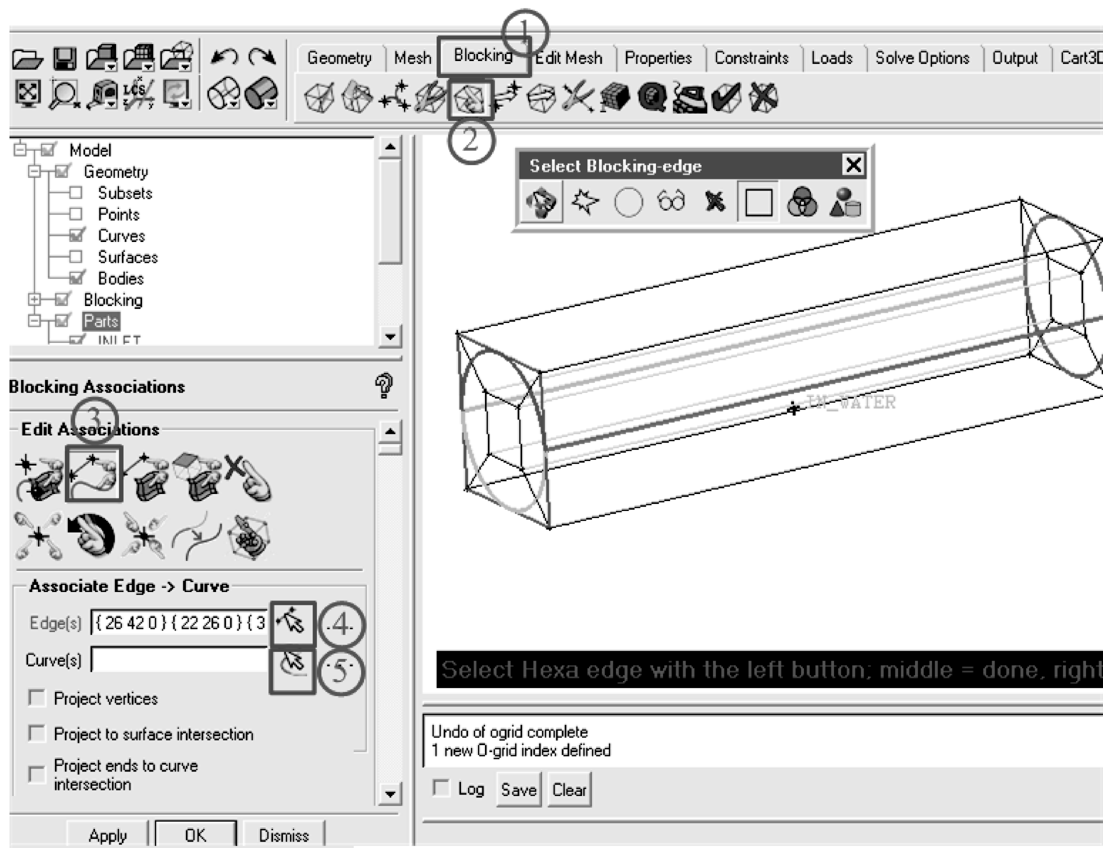


图 3-136　拓扑边界关联

11）拓扑适应结构：由于拓扑结构并没有与结构曲面完全贴合，为了后续操作的方便，这一步进行拓扑适应结构操作，操作步骤如图 3-137 所示。单击【Blocking】标签，选择【Associate】，在左侧选项栏里，单击【Snap Project Vertices】，然后单击【Apply】按钮，拓扑自动适应到结构上去，如图 3-137 所示。

12）赋予网格尺寸：首先设定网格的全局尺寸，如图 3-138 所示。单击【Mesh】标签，选择【Global Mesh Setup】，在左侧选项栏里，在【Max element】选项栏里输入 4，单击【Apply】按钮，完成全局网格尺寸赋值。接下来将设定的网格尺寸赋给，拓扑结构，如图 3-139 所示。单击【Blocking】标签，然后单击【Pre-Mesh Params】，在左下侧的选项栏中选择【Update Sizes】，然后单击【Apply】按钮，程序将网格参数赋给，拓扑结构。

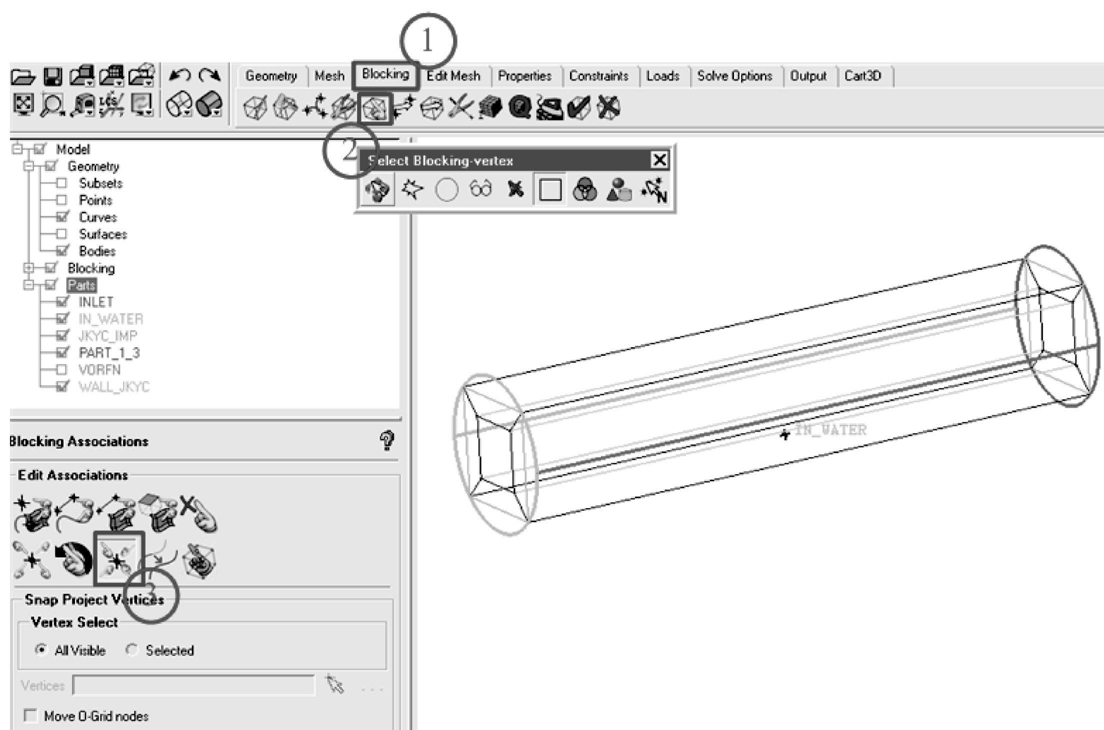


图 3-137　拓扑适应结构

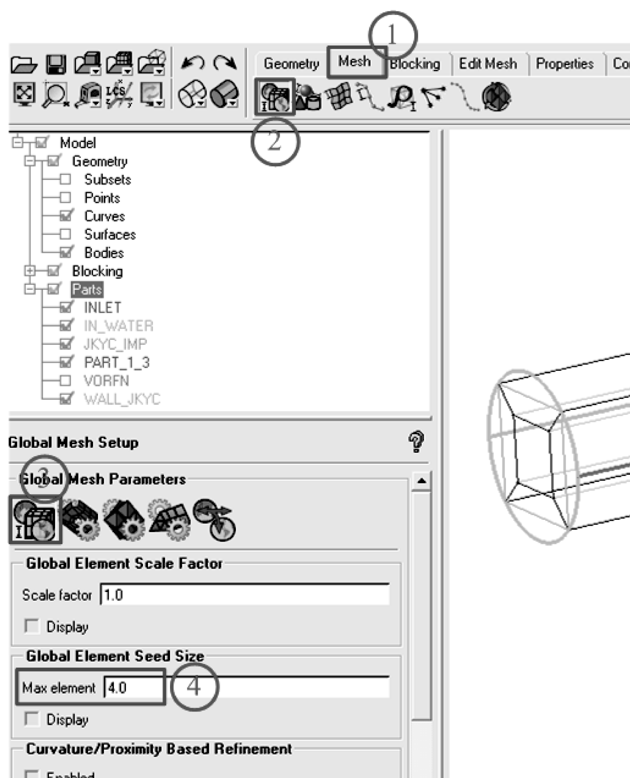


图 3-138　全局网格赋值

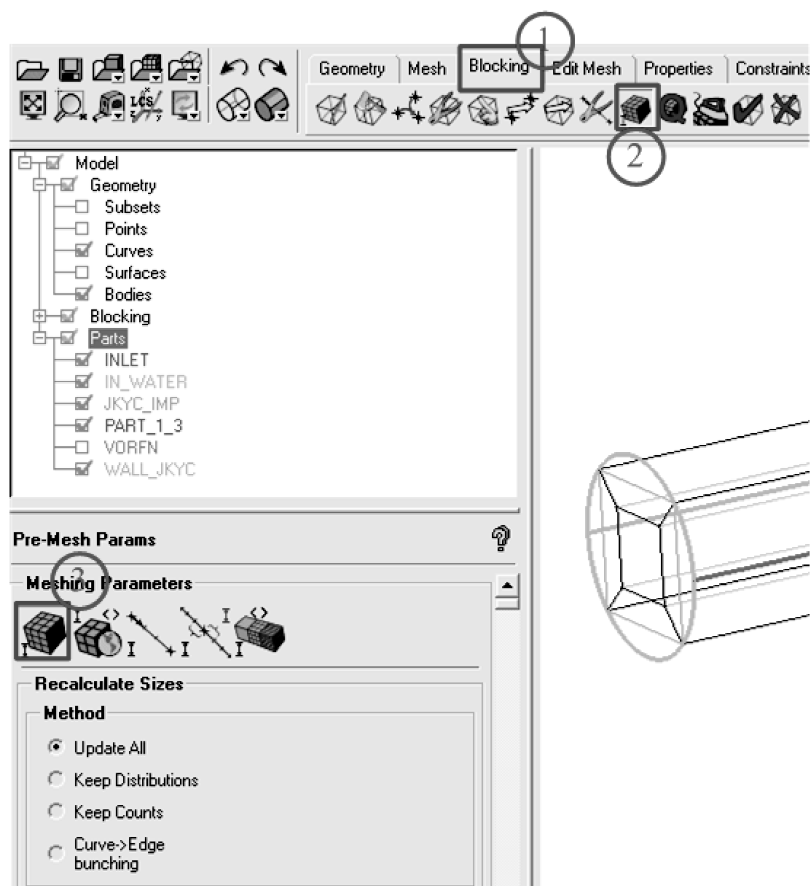


图 3-139　网格值赋给拓扑结构

13）生成网格：勾选左上侧窗口中的【Pre-Mesh】，如图 3-140 所示，生成结构网格。

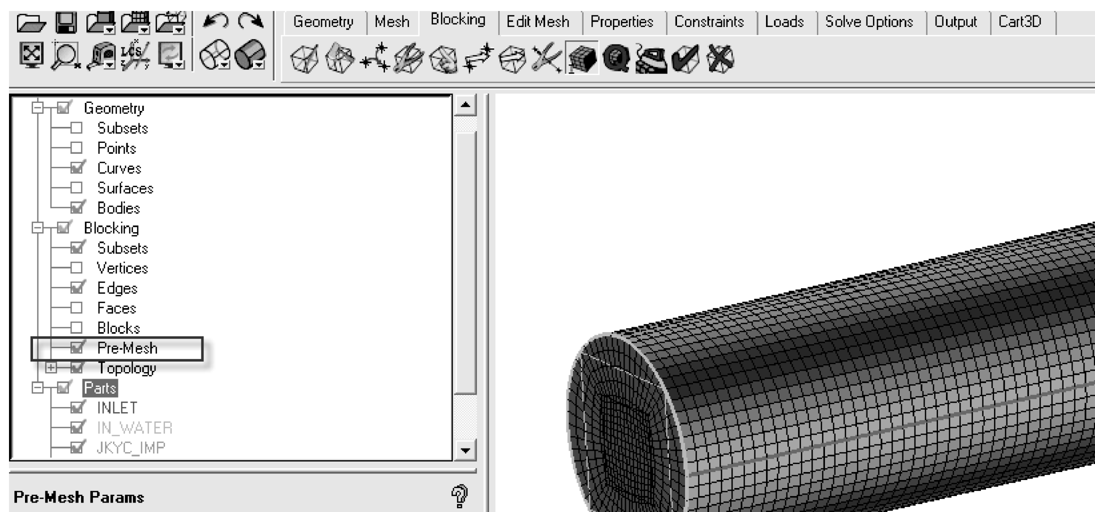


图 3-140　生成结构网格

14）生成边界层网格：方法如图 3-141 所示，单击【Blocking】标签，选择【Pre-Mesh Params】，在左下侧选项栏里，选择【Edge Params】，在选项【Edge】后单击，在右侧的窗口中选中“O”型拓扑结构的边界层，如图 3-141 中红色拓扑线所示；在选项【Mesh law】中选择【Exponential1】，并在下面选项【Spacing 1】的输入栏中输入 0.2；然后勾选下方的【Copy Parameters】，最后单击【Apply】按钮，程序完成边界层网格的赋值。这里输入的 0.2，是指第一层网格节点到壁面的距离为 0.2mm（有了这个距离和雷诺数可以求出 CFD 计算所需要的 Y + 值）。勾选左上侧选项栏中的【Pre-Mesh】，可以看到生成的边界层网格，如图 3-142 所示。注意，对于叶片泵这类旋转机械而言，如果要准确模拟其内部流动情况，需要生成边界层网格。

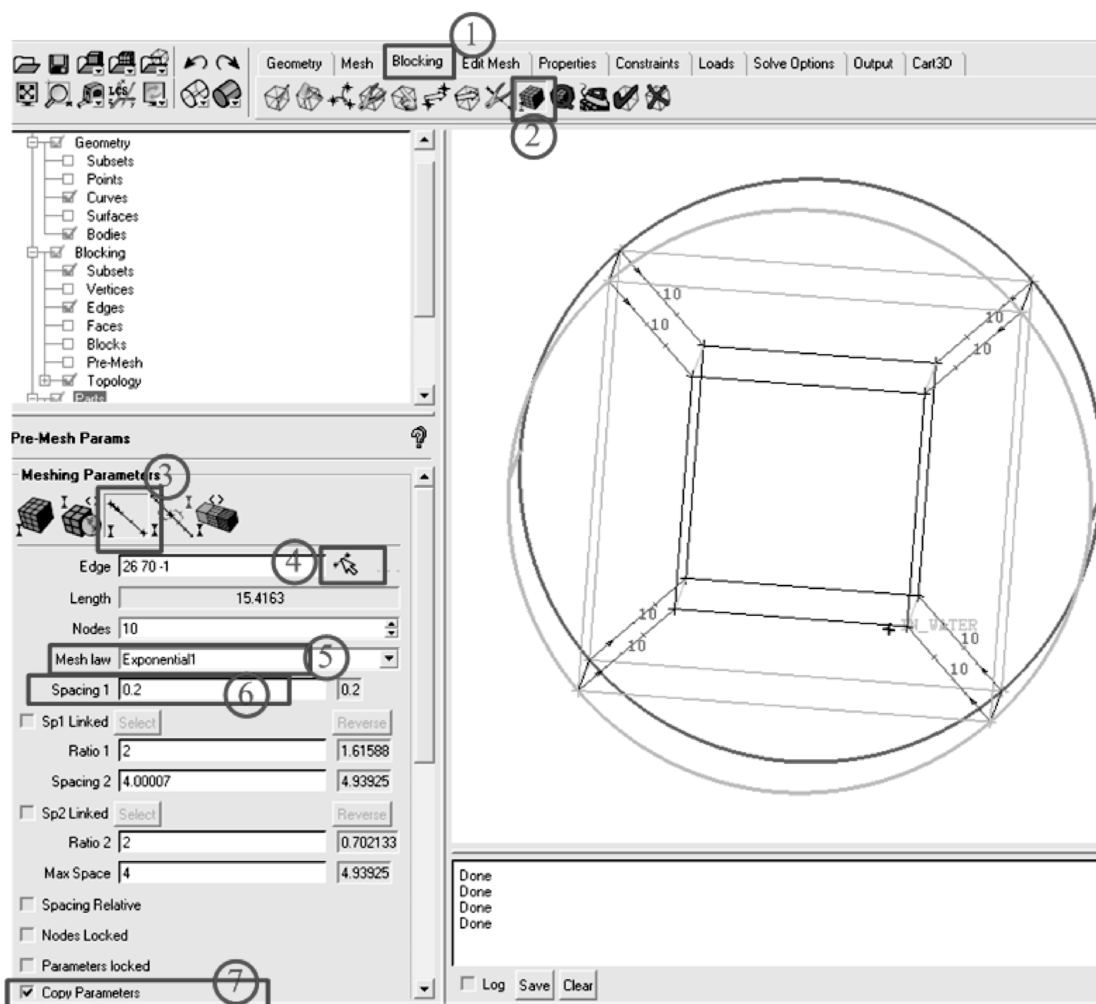


图 3-141　生成边界层网格过程

15）查看网格质量：如图 3-143 所示，单击【Blocking】标签，选择【Pre-Mesh Quality Histograms】，在左下侧选项栏里，在【Criterion】里选择 Determinant 2 ×2 ×2，在【Max-Y height】中输入 20，单击【Apply】按钮，可以查看结构网格质量。

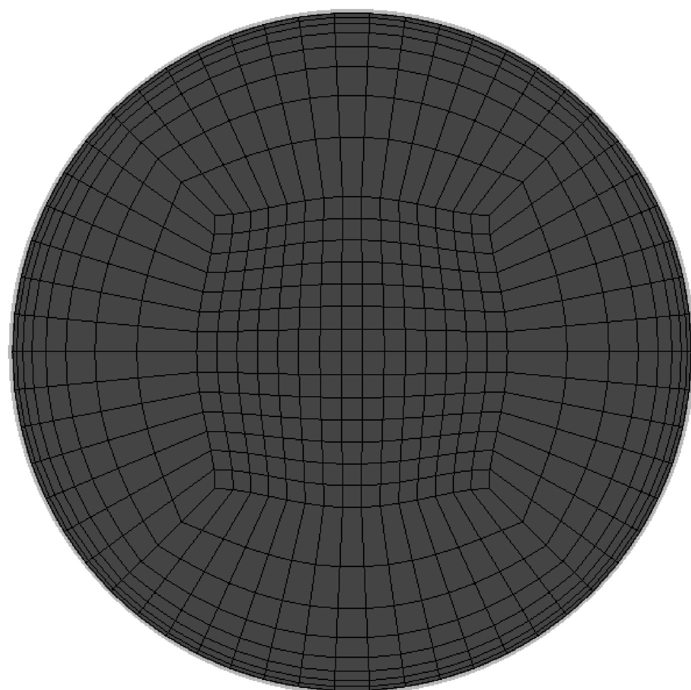


图 3-142　边界层网格

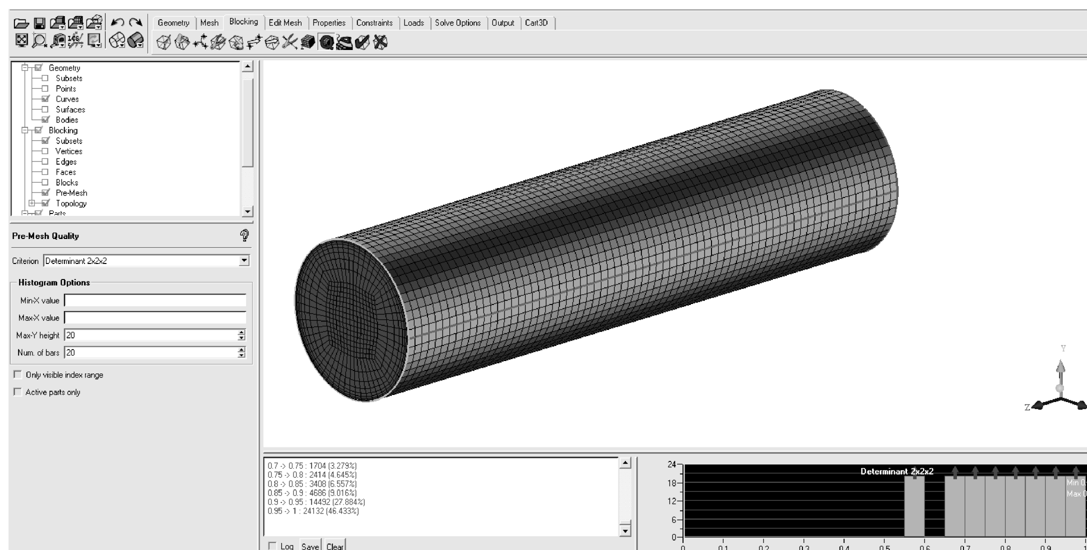


图 3-143　查看结构网格质量

16）保存网格：右键单击左上侧窗口中【Model】→【Blocking】→【Pre-Mesh】，选择【Convert to Unstruct Mesh】命令，如图 3-144 所示。单击【File】→【Mesh】→【Save Mesh】，保存当前的网格文件。

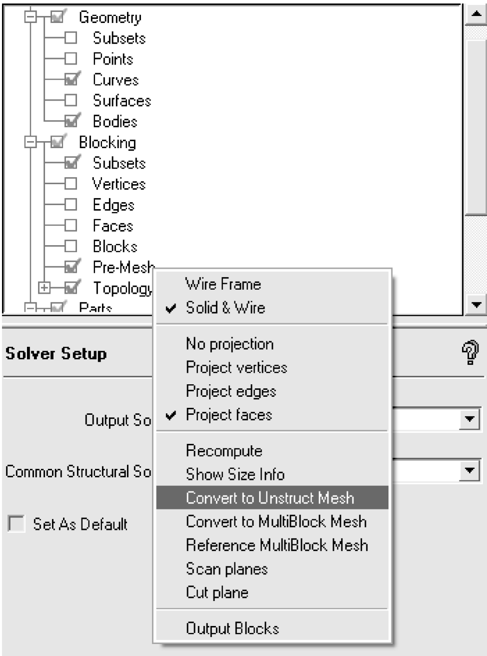


图 3-144　网格转换

17）导出计算网格文件：不同的求解器需要不同的输出格式，图 3-145 为 CFX 求解器所需的网格文件格式。单击【Output】标签，选择【Select Solver】，弹出左下侧的选项栏，在选项【Output Solver】中选中 ANSYS CFX；然后单击【Output】→【Write input】，弹出如图所示的对话框，修改导出计算网格文件的名称，单击【Done】按钮，导出 CFX 计算所需的 cfx5 网格文件。

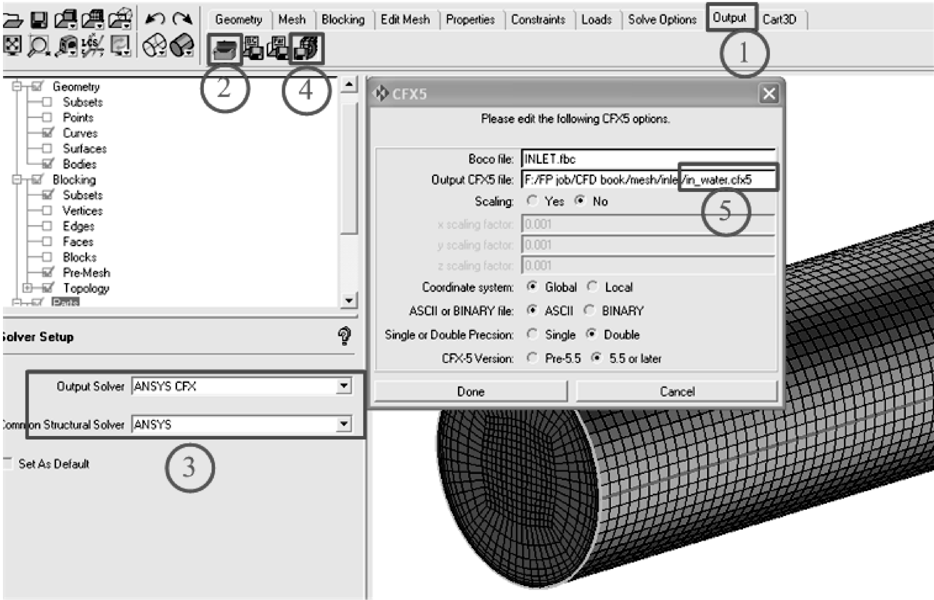


图 3-145　导出计算网格文件

第4章 数值计算及实例

本章通过实例详细介绍了 CFX 进行叶片泵数值计算的方法。主要包括网格的导入方法、湍流模型的选择、边界条件的指定等 CFX 设置方法，并通过实例讲解了叶片泵定常计算、非定常计算、汽蚀计算过程以及过渡过程计算的过程。

4.1 叶片泵定常计算

1）创建工作目录：打开 CFX，在【Working Directory】后面单击，在弹出的窗口中选择工作目录，如图 4-1 所示。



图 4-1　设置工作目录对话框

2）进入 CFX-Pre 工作环境：单击 CFX-Pre 12.0 图标，弹出程序工作环境，如图 4-2 所示。

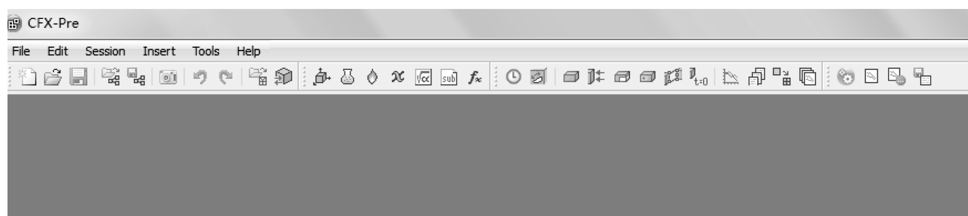


图 4-2　CFX-Pre 工作环境

3）新建计算文件：单击【File】→【New Case】，在弹出的对话框中选择【General】并单击【OK】；单击【File】→【Save Case】，将计算文件保存为 Steady. cfx。

如图 4-3 所示，CFX 主界面主要分为主菜单、控制树、主工具箱、浏览工具条、浏览界面以及信息窗口等六部分。

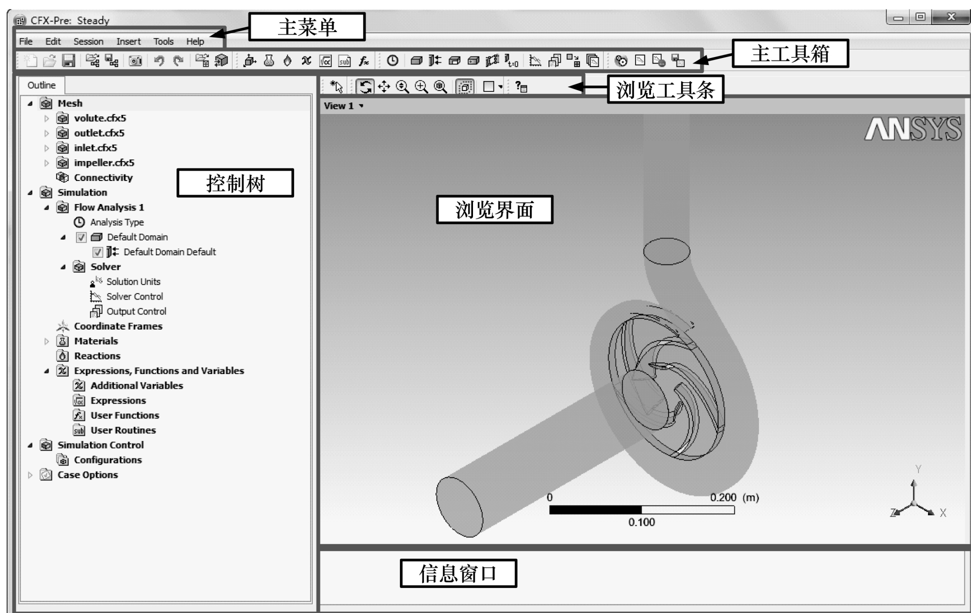


图 4-3　CFX-Pre 工作界面简介

离心泵 CFX 计算设置按照控制树由上至下的顺序来定义模型。

4）导入计算网格文件：单击【File】→【Import】→【Mesh】，弹出导入对话框，如图 4-4 所示，在 Files of type 中选择 ICEM CFD（*.cfx *.cfx5），右侧的 Mesh Units 选择 mm。选择导入的网格文件，单击【Open】。导入网格文件后在 CFX 中显示如图 4-5，控制树中出

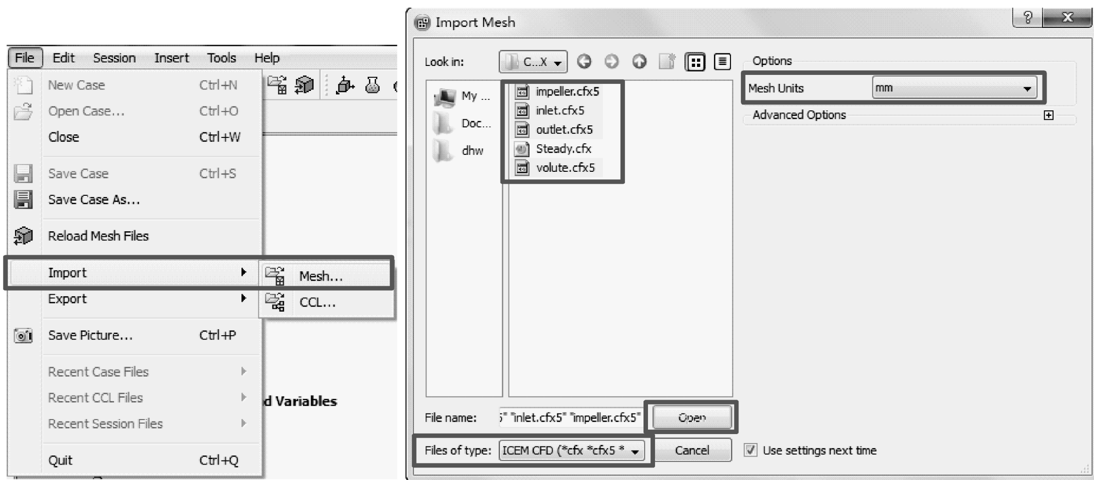


图 4-4　导入网格文件选项

现软件自动创建的计算域。注意选择网格时候要选择所有的网格文件（主要包括 Impller. cfx5、Inlet. cfx5、outlet. cfx5 以及 volute. cfx5 等四个文件）。

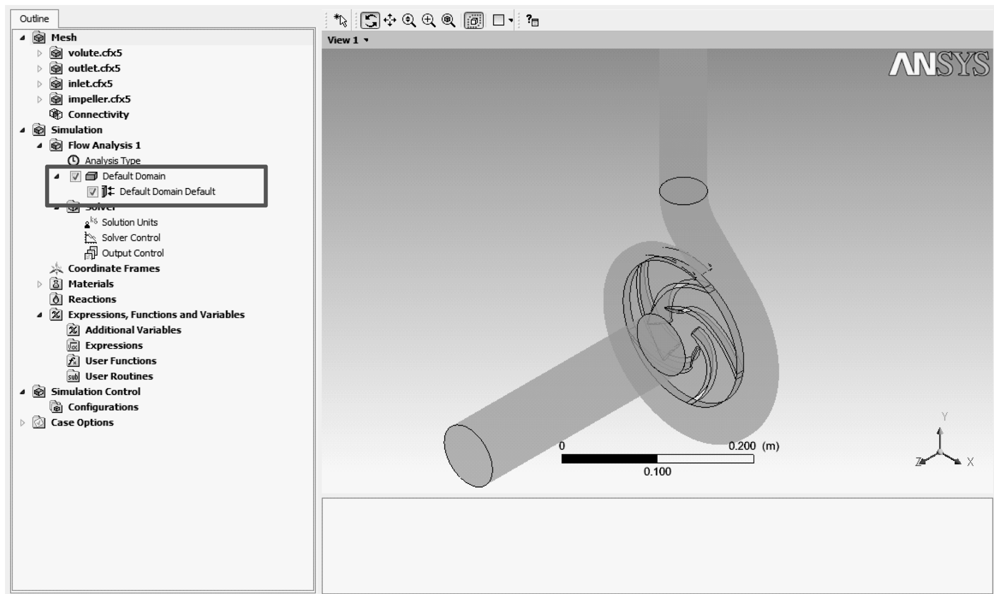


图 4-5　导入网格文件

5）定义计算类型：这里需要定义计算是定常还是非定常。在左侧模型树上选择【Analysis Type】，双击进入属性编辑，如图 4-6 所示。如果是定常计算，就将【Analysis Type】选为【Steady State】，并单击【Apply】按钮，完成计算类型的定义。

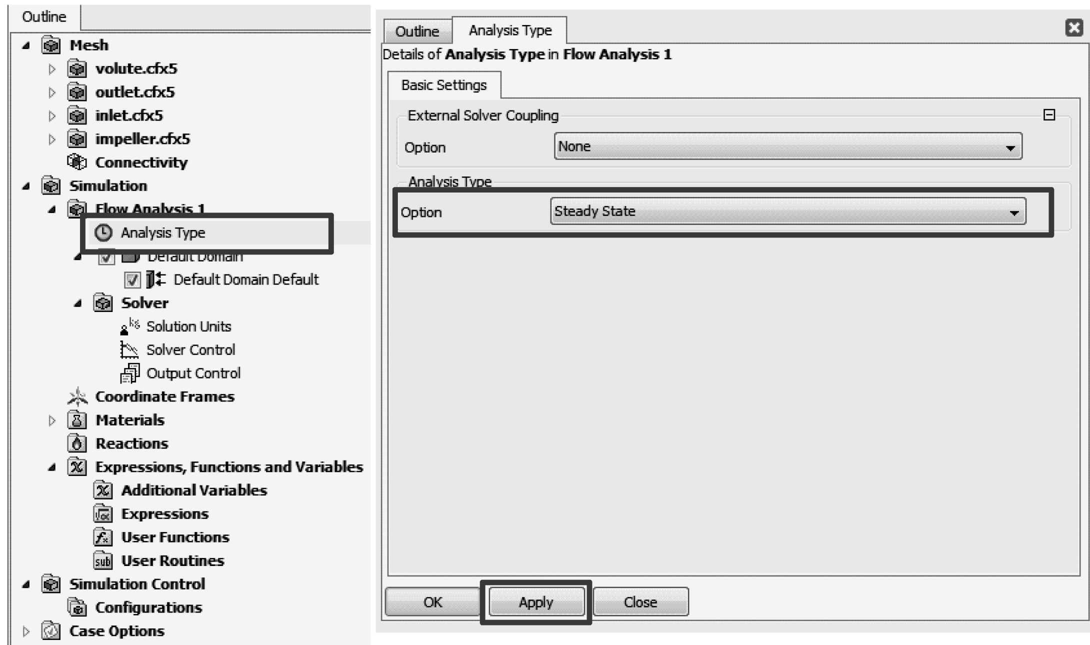


图 4-6　定义计算类型

6）定义计算域：首先对各个计算网格进行定义，单击【Insert】→【Domain】或直接单击工具条上的▭，弹出的对话框，并在对话框中输入计算域名称，如图 4-7 所示。这里需要定义的有叶轮 IMPELLER、进口延长段 INLET、蜗壳 VOLUTE、出口延长段 OUTLET。

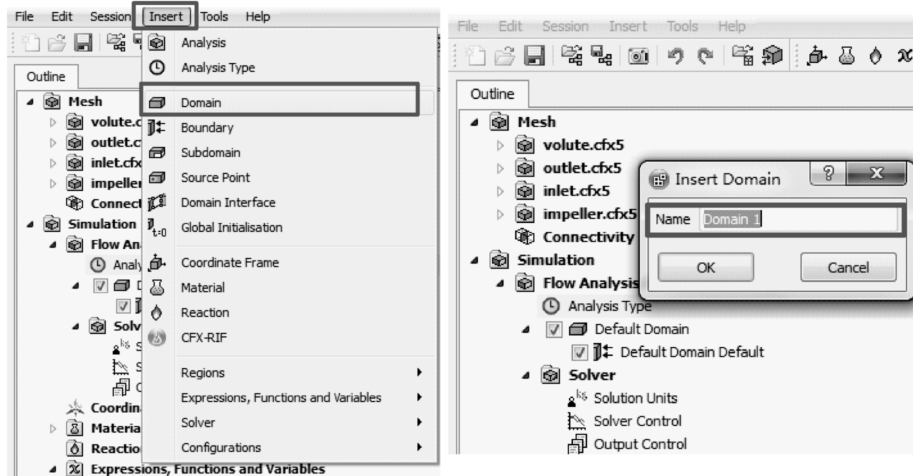


图 4-7　创建计算域

7）定义叶轮计算域属性：计算域属性定义中主要包括计算域基本属性、运动属性、传热模型和湍流模型等。离心泵四个计算域中，叶轮属于旋转域，进口延长段、蜗壳及出口延长段属于静止域。

对于叶轮旋转域，在定义计算域名称 IMPELLER 后，单击【OK】按钮，左侧控制树弹出计算域选项卡，如图 4-8 所示。单击【Location】后的 ... ，弹出图 4-8 的【Selection Dia-

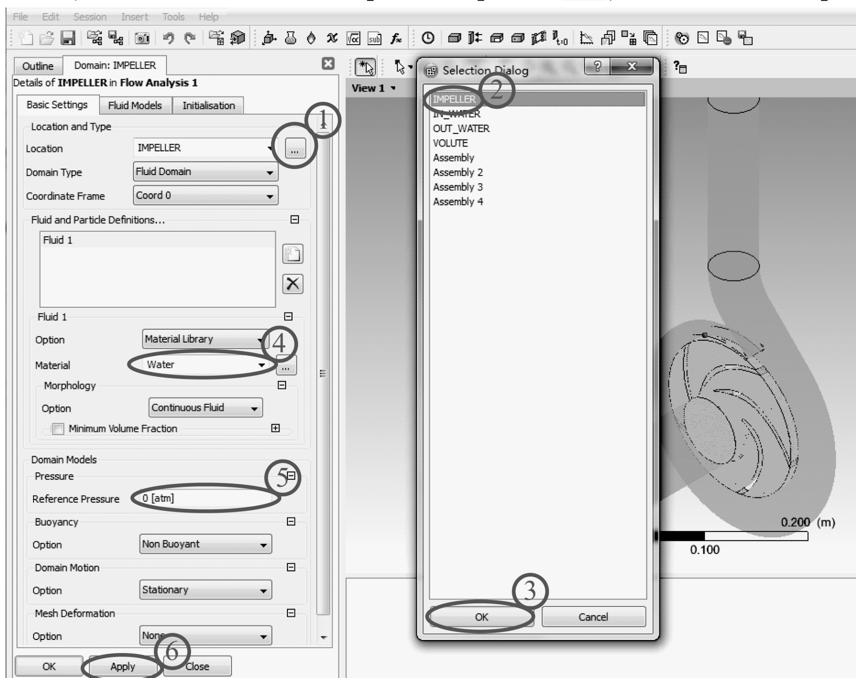


图 4-8　定义叶轮计算域属性

log】，选中叶轮计算网格，单击【OK】按钮；在流体属性中，选择材料为 Water；在参考压力输入框中，输入参考压力为 0 atm，定义计算域属性过程如图 4-8 所示。

定义叶轮旋转域的运动属性。控制树向下拉会看见 Domain Motion 区域，单击该区域下的【Option】→【Rotating】，在下面的【Angular Velocity】输入栏里输入叶轮的旋转速度，旋转速度的正负服从“右手法则”，“大拇指”指向旋转轴方向；在下方【Axis Definition】区域定义旋转轴如图 4-9 所示。

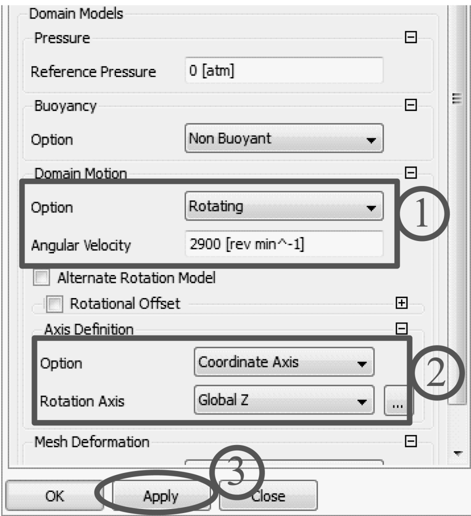


图 4-9　定义叶轮运动属性

定义叶轮传热模型和湍流模型。由于 CFD 求解纳维-斯托克方程，需要传热模型以及湍流模型，方程才可以闭合，因此需要定义传热及湍流模型。控制树选择【Fluid Models】定义，定义过程如图 4-10 所示。

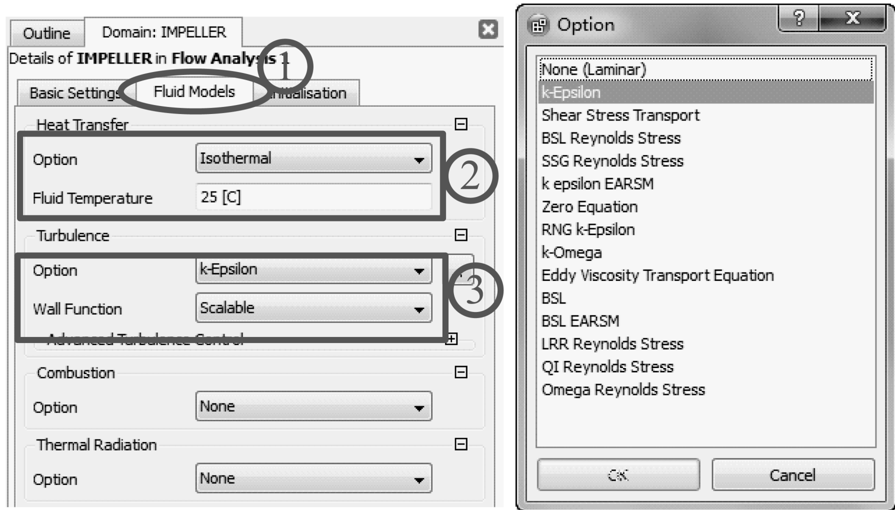


图 4-10　定义叶轮传热模型和湍流模型

对于湍流模型的选择，从图 4-10 可以看到，CFX 中有叶片泵 CFD 计算常用的湍流模型，主要包括：k-Epsilon、RNG k-Epsilon、Shear Stress Transport（SST）、k-Omega 等。其中 k- Epsilon 模型是目前应用最广泛的工程湍流模型，其方程以耗散尺度作为特征长度，由求解相应的偏微分方程得到，适用范围更为广泛。研究结果表明，它能够较好地用于某些复杂的三维湍流。该方法已经广泛地应用于流体机械内部的流场预测。重整化群 k-ε 湍流模型（Renormalization Group，RNG k-ε）就是对标准 k-ε 湍流模型的一种改进，在模拟间隙中由于剪切运动导致的湍流作用时有较大的优势。SST k-ω 模型是在 BSL k-ω 模型的基础上改进了涡黏性的表达式，以考虑湍流主切应力主项的影响，这样，SST k-ω 模型使得对逆压梯度

流动的预测（如分离流）得到了重要的改进。选择不同湍流模型对于计算结果略有差异，需根据实际情况进行比较选择。

8）定义静止域属性：离心泵静止计算域包括进口延长段、蜗壳及出口延长段三部分，命名分别为进口延长段 INLET、蜗壳 VOLUTE、出口延长段 OUTLET，其计算域基本属性、传热模型和湍流模型等与叶轮计算域定义相同。在运动属性定义中，由于这三部分为静止部分，单击【Domain Motion】下的【Option】选择 Stationary。详细的定义过程如图 4-11、图 4-12、图 4-13 所示。

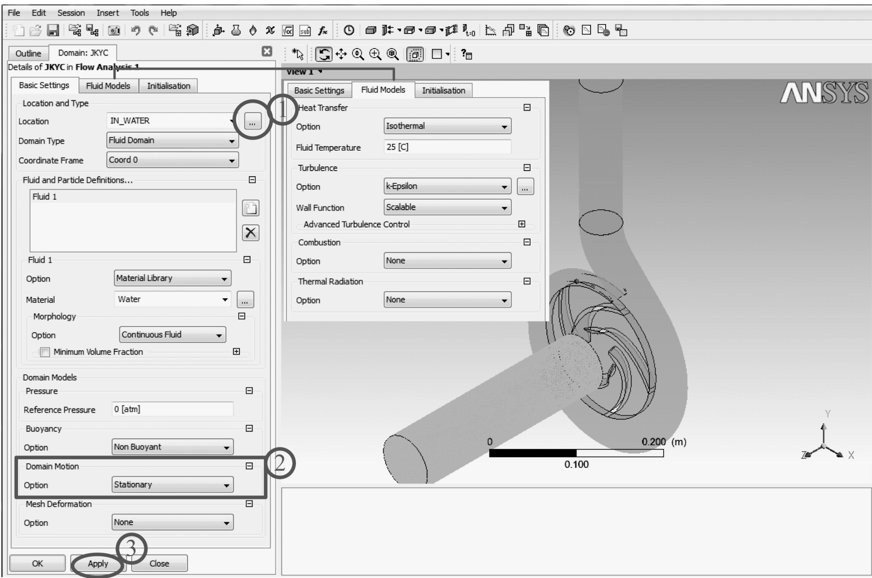


图 4-11　定义进口延长段计算域属性

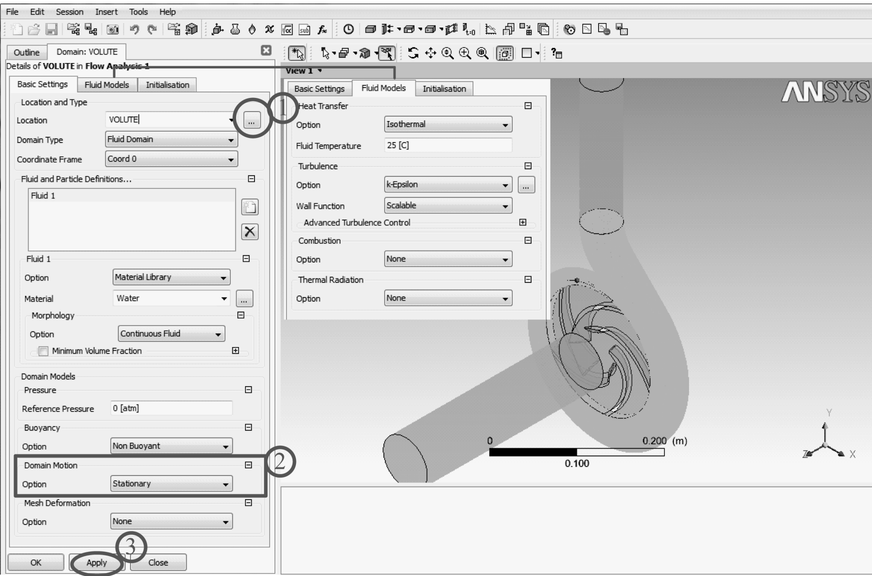


图 4-12　定义蜗壳计算域属性

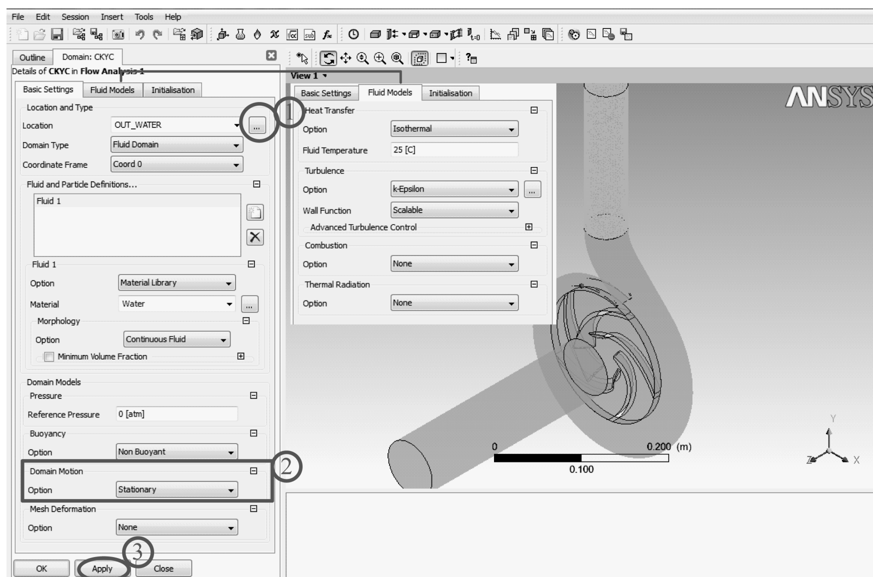


图 4-13　定义出口延长段计算域属性

9）定义进口边界条件：CFD 计算需要定义两端边界，即“进口边界”和“出口边界”。进口边界定义在进口延长段的进口边。单击【Insert】→【Boundary】→【Inlet Domain】或直接单击工具条上的 ▾ 并选中下拉菜单中的 Inlet 计算域，在弹出的对话框中输入 inlet，如图 4-14 所示。

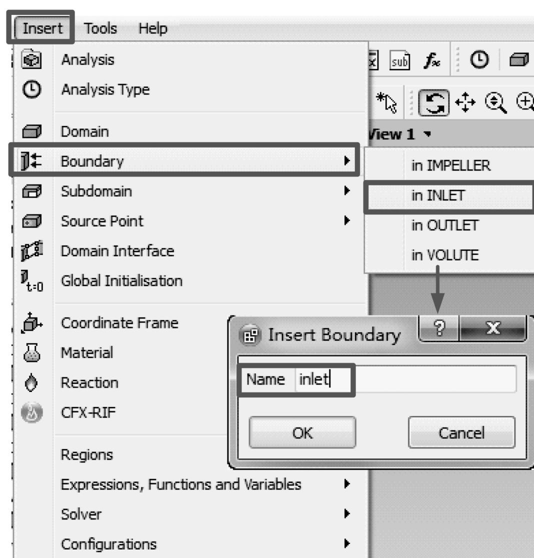


图 4-14　创建进口边界

在创建名称为 inlet 的进口边界后，单击【OK】按钮，左侧控制树弹出边界条件属性编辑标签，如图 4-15 所示。在第一个标签【Basic Settings】中，选择【Boundary Type】为

【Inlet】；单击 Location 后的 ，在弹出的对话框中选择对应的进口延长段的进口表面。单击第二个标签【Boundary Details】，在【Mass And Momentum】中的【Option】栏选择 Total Pressure（stable）作为边界条件类型，并输入具体的值为 1atm；定义入口的湍流强度，【Turbulence】选为 Medium（Intensity = 5%）；单击【Apply】按钮，完成进口边界条件定义，如图 4-15 所示。

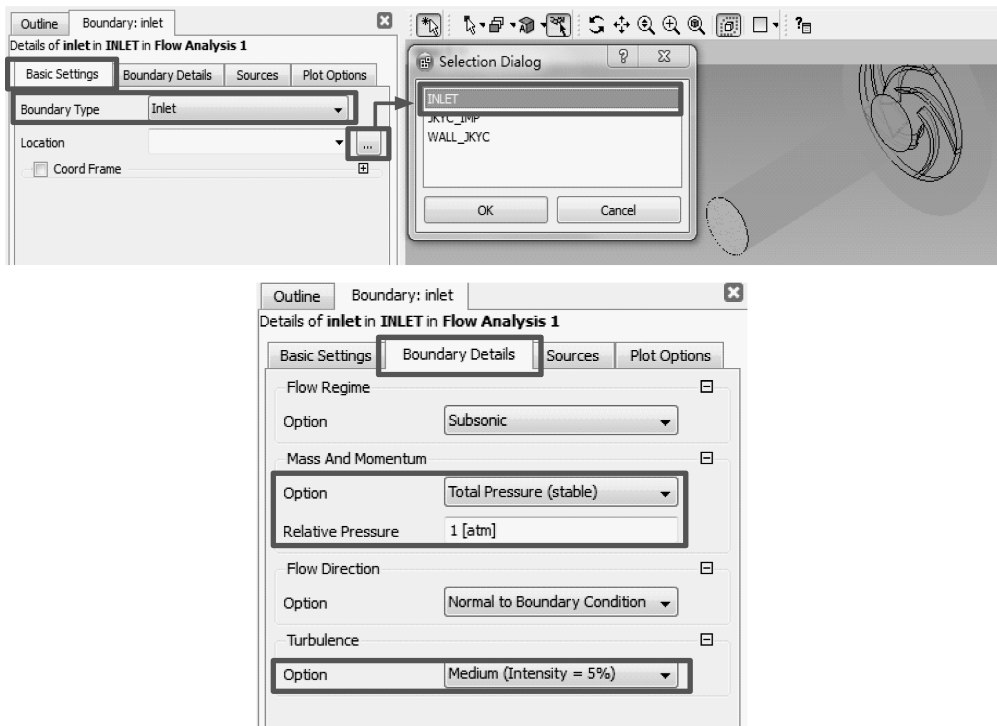


图 4-15　进口边界条件定义

10）定义出口边界条件：创建出口边界步骤与创建进口边界相同，单击【Insert】→【Boundary】→【Outlet Domain】或直接单击工具条上的 并选中下拉菜单中的 Outlet 出口延长段计算域，在弹出的对话框中输入 outlet，单击【OK】按钮，左侧控制树弹出边界条件属性编辑标签，如图 4-16 所示。

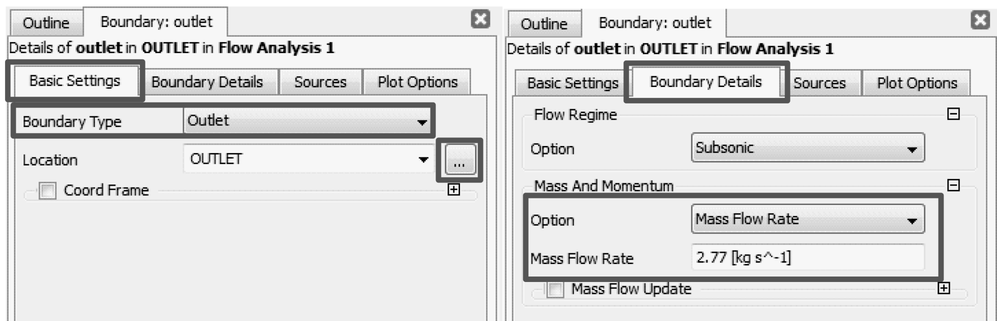


图 4-16　出口边界条件定义

在第一个标签【Basic Settings】中，【Boundary Type】选择为 Outlet；单击 Location 后的 ...，在弹出的对话框中选择对应的出口延长段的出口表面。单击第二个标签【Boundary Details】，在【Mass And Momentum】的【Option】中选择 Mass Flow Rate 作为边界条件类型，并输入具体的值为 2.77kg/s（根据泵的流量进行定义），也可选择 Normal Speed 作为边界条件并输入相对应的出口速度值；单击【Apply】按钮完成出口边界条件定义。

11）定义旋转计算域的壁面条件：单击【Insert】→【Boundary】→【IMPELLER】或直接单击工具条上的并选中下拉菜单中的 IMPELLER 叶轮计算域，在弹出的对话框中输入 blade，单击【OK】按钮，左侧控制树弹出边界条件属性编辑标签，如图 4-17 所示。在第一个标签【Basic Settings】中，选择【Boundary Type】为 Wall；单击【Location】后的 ...，在弹出的对话框中选择对应的叶片表面；参考坐标系【Frame Type】选为 Rotating。单击第二个标签【Boundary Details】，在【Mass And Momentum】的【Option】中选择 No Slip Wall 作为边界条件类型；在【Wall Velocity】的【Option】中选择 Rotating Wall，并输入具体的值为 0 [rev min-1]；旋转轴选为 Global Z，与叶轮旋转坐标一致；壁面的表面粗糙度【Wall Roughness】选为无滑移壁面 Smooth Wall（读者可以根据实际情况定义表面粗糙度的大小）；单击【Apply】按钮，完成旋转计算域壁面条件定义。旋转计算域的其余壁面（前盖板 shroud 和后盖板 hub）与叶片 blade 定义方式相同，定义后叶轮旋转域壁面条件如图4-18所示。

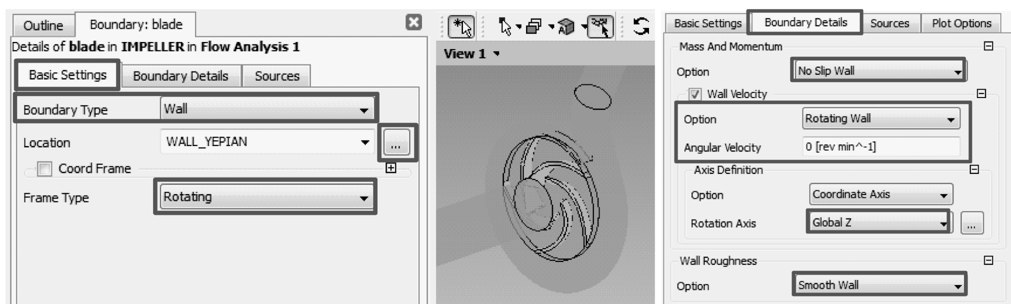


图 4-17　叶轮旋转域的叶片的壁面边界条件定义

12）定义静止计算域的壁面条件：单击【Insert】→【Boundary】→【Volute Domain】或直接单击工具条上的并选中下拉菜单中的 VOLUTE 静止计算域，在弹出的对话框中输入 volute wall，单击【OK】按钮，左侧控制树弹出边界条件属性编辑标签，如图 4-19 所示。在第一个标签【Basic Settings】中，选择【Boundary Type】为 Wall；单击【Location】后的 ...，在弹出的对话框中选择对应的蜗壳壁面；参考坐标系【Frame Type】默认为全局静止坐标系。单击第二个标签【Boundary Details】，在【Mass And Momentum】的【Option】中选择 No Slip Wall 作为边界条件类型；不勾选【Wall Velocity】选项；壁面的表面粗糙度【Wall Roughness】选为无滑移壁面 Smooth Wall（读者可以根据实际情况定义表面粗糙度的大小），单击【Apply】按钮完成静止计算域壁面条件定义。静止计算域的其余壁面包括进口延长段管道壁面、

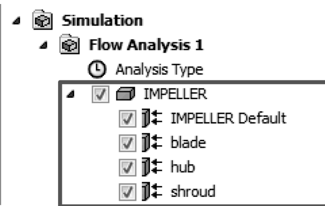


图 4-18　旋转计算域的壁面边界条件定义结果

出口延长段管道壁面的边界条件定义类同，定义后静止计算域壁面条件如图 4-20 所示。

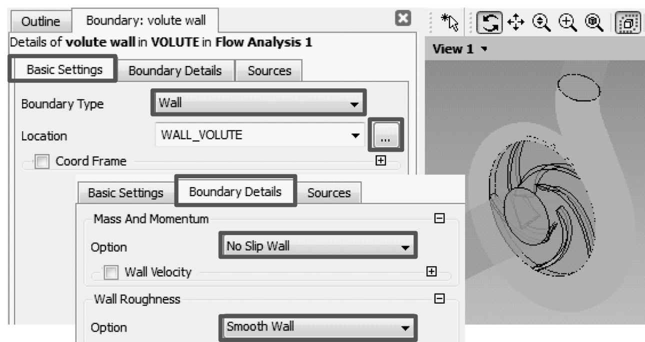


图 4-19　蜗壳静止域的壁面边界条件定义

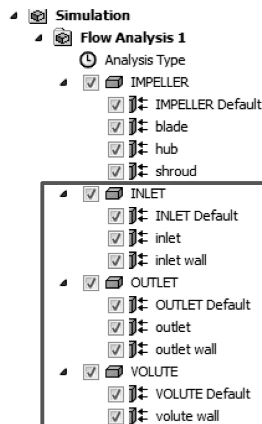


图 4-20　静止域壁面边界条件

13）定义动-静计算域交界面：交界面的定义的作用是为了不同计算域之间数据传递。由于存在动、静两种计算域，需要采用多重参考系 MRF，因此需要在动静计算域之间设置数据交界面。离心泵动-静计算域交界面包括进口延长段与叶轮间交界面 Interface 1，叶轮与蜗壳间交界面 Interface 2。以进口延长段与叶轮间交界面的动-静计算域交界面定义为例，单击【Insert】→【Domain Interface】或直接单击工具条上的图标，在弹出的对话框中输入 Interface 1，单击【OK】按钮，左侧控制树弹出交界面属性编辑标签，如图 4-21 所示。

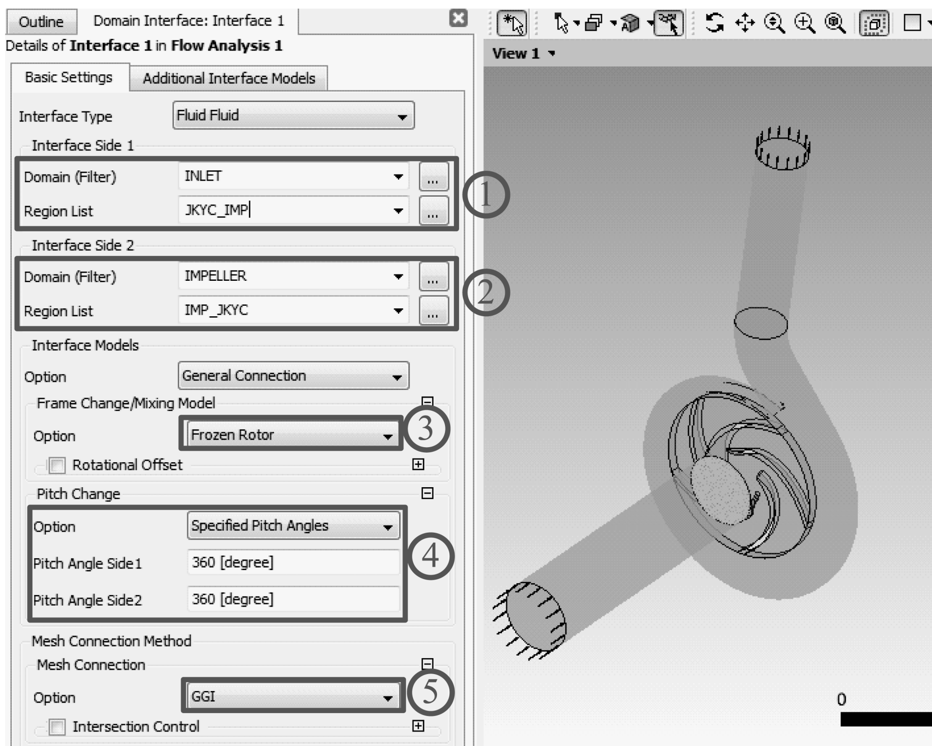


图 4-21　定义进口延长段与叶轮间动-静计算域交界面

在第一个标签【Basic Settings】中，在【Interface Side 1】的【Domain】后单击…，在弹出的对话框中选择进口延长段计算域 INLET，在【Region List】后单击…，在弹出的对话框中选择进口延长段与叶轮相连接的表面 JKYC_IMP；在【Interface Side 2】的【Domain】后单击…，在弹出的对话框中选择叶轮计算域 IMPELLER，在【Region List】后单击…，在弹出的对话框中选择叶轮与进口延长段相连接的表面 IMP_JKYC；交界面的连接模型【Interface Model】的【Option】选为【General Connection】；坐标系变换【Frame Change/Mixing Model】的【Option】选为【Frozen Rotor】；面积比【Pitch Change】的【Option】选为【Specified Pitch Angles】，并输入具体的值【Pitch Angle Side 1】为 360°，【Pitch Angle Side 2】为 360°；网格连接方式【Mesh Connection】选为【GGI】；单击【Apply】按钮完成进口延长段与叶轮交界面的动-静计算域交界面定义。叶轮与蜗壳间交界面的动-静计算域交界面定义与此相同，具体如图 4-22 所示。

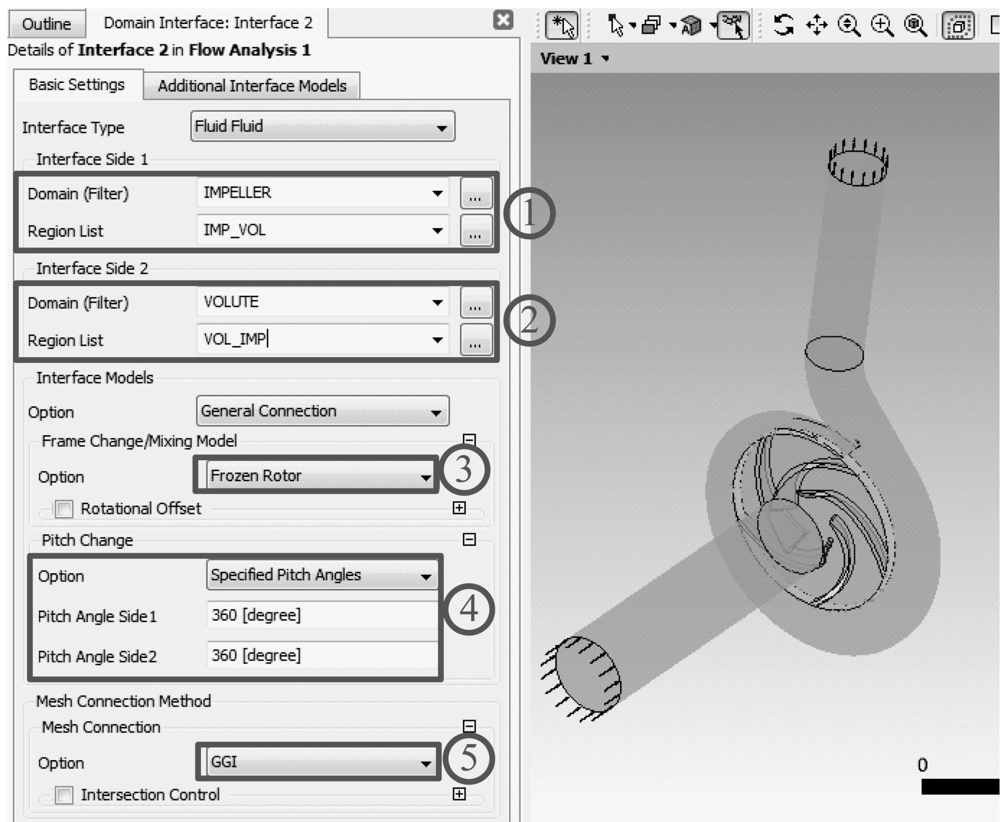


图 4-22　定义叶轮与蜗壳间动-静计算域交界面

14）定义静-静计算域交界面：离心泵静-静计算域交界面为蜗壳与出口延长段间交界面 Interface 3。单击【Insert】→【Domain Interface】或直接单击工具条上的图标，在弹出的对话框中输入 Interface 3，单击【OK】按钮，左侧控制树弹出交界面属性编辑标签，如图 4-23 所示。在第一个标签【Basic Settings】中【Interface Side 1】的【Domain】后单击…，在弹出的对话框中选择出口延长段计算域 OUTLET，在【Region List】后单击…，在弹出的对话

框中选择出口延长段与蜗壳相连接的表面 CKYC_VOL；在【Interface Side 2】的【Domain】后单击 ，在弹出的对话框中选择涡壳计算域 VOLUTE，在【Region List】后单击 ，在弹出的对话框中选择蜗壳与出口延长段相连接的表面 VOL_CKYC；交界面的连接模型【Interface Model】选为【General Connection】；坐标系变换【Frame Change/Mixing Model】选为 None；面积比【Pitch Change】的【Option】选为 None；网格连接方式【Mesh Connection】的【Option】选为【GGI】；单击【Apply】按钮完成静-静计算域交界面的定义。

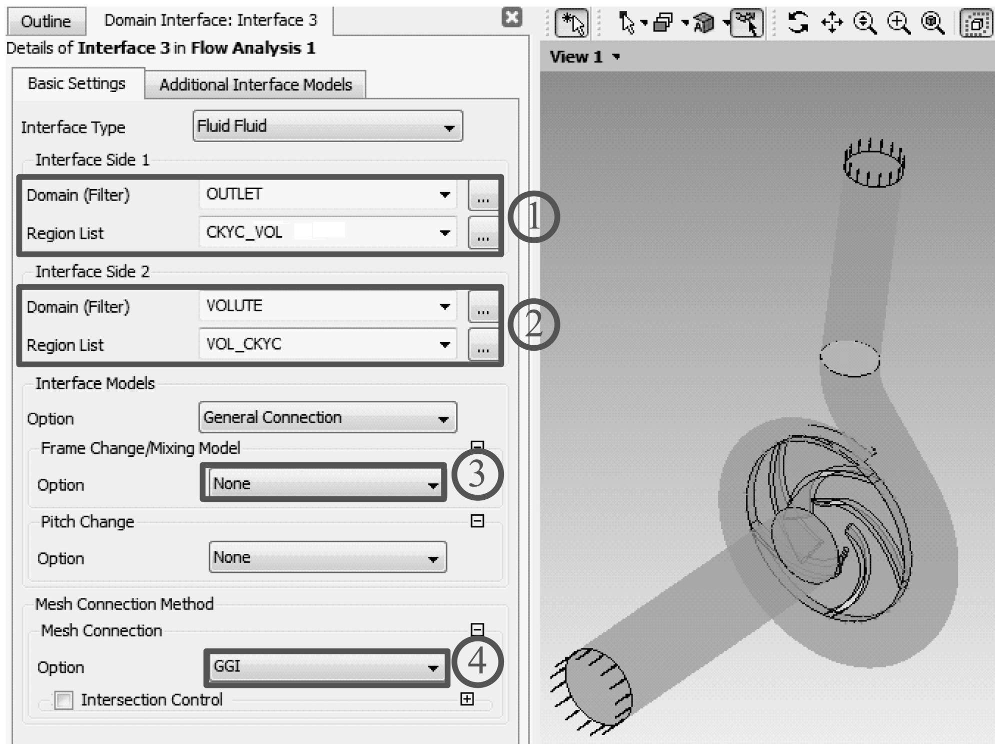


图 4-23　定义蜗壳与出口延长段间静-静计算域数据交界面

15）定义求解器参数：双击模型树上的【Solver Control】或直接单击工具条上的 ，左侧控制树弹出求解参数属性编辑标签，如图 4-24 所示。在第一个标签【Basic Settings】中，在对流项【Advection Scheme】的【Option】选为 High Resolution；湍流数值项【Turbulence Numerics】的【Option】选为 First Order；设置求解总步数，【Convergence Control】的【Max. Iterations】输入 1000（读者可以自行调整）；求解参数的时间项【Timescale Control】选为 Physical Timescale，并输入具体值为 0. 002［s］（一般设为叶轮转速的倒数）；收敛判据【Convergence Criteria】选为平均值 RMS，并输入具体的值（收敛精度越高计算结果越准确但计算时间越长，取 1. E -4 即满足一般的工程需要）；单击【Apply】按钮，完成求解器参数的定义。注意，CFX 计算终止有两种方式，一是计算求解步数达到设定的求解总步数，二是达到收敛精度，只要一个条件满足则计算终止。

16）导出求解文件：在主工具箱最右端选择【Write Solver Input File】，如图 4-25 所示，在弹出的对话框中输入求解文件的名称，并保存。

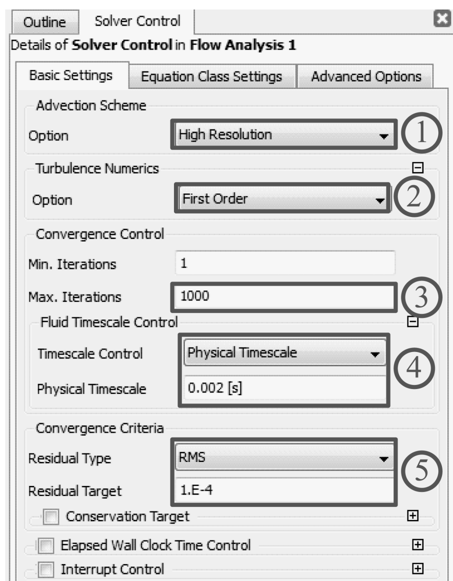


图 4-24　求解器控制参数定义

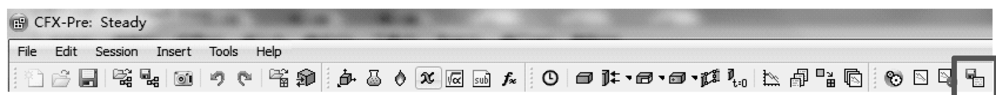


图 4-25　导出求解文件

17）计算：找到上步保存好的 . def 文件，双击打开，弹出如图 4-26 所示对话框，在进行定常计算时通常不需要初始流场。网格较少的情况下不需要开启并行计算模式，开启并行计算的方法如图 4-26 标注，在【Run Mode】的复选框中选择【HP MPI Local Parallel】，单击 + 按钮，增加并行 CPU 的个数。在下方【Run Environment】中选择要保存结果的工作目录。最后单击【Start Run】按钮，开始计算。

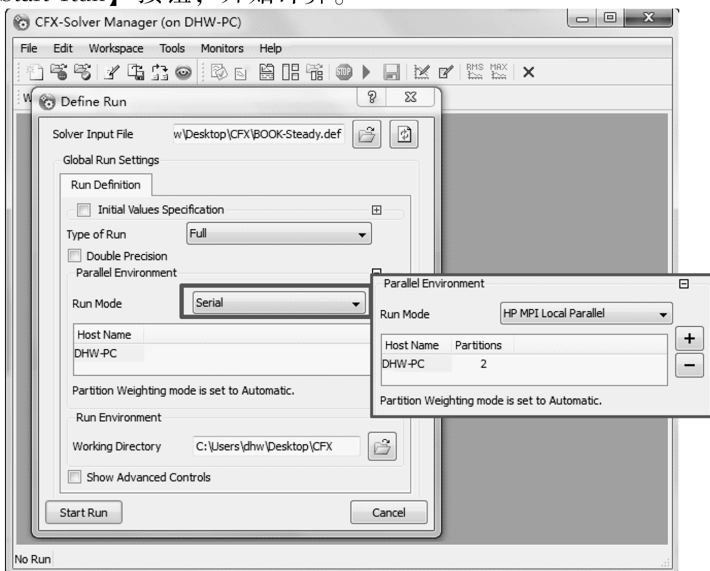


图 4-26　定常文件及并行计算的设置

18）不同工况的计算：通常对泵的计算要考虑到多个工况，只需要在以上操作的第 10）步根据工况改变质量流量出口边界条件，其余的操作不变。

4.2　叶片泵非定常计算

非定常计算通常在定常计算的基础上进行修改获得，具体修改操作分为以下几步：

1）瞬态设置：在左侧模型树上选择【Analysis Type】，双击进入属性编辑，如图 4-27 所示。非定常计算将【Analysis Type】的【Option】选为【Transient】；接下来定义非定常计算总计算时间，一般非定常计算需要计算 5～8 个叶轮旋转周期方可得到可靠的解，定义步骤如图 4-28 所示，在【Time Duration】下的【Total Time】输入框中输入总的计算时间，比如本例的叶轮转速是 2900r/min，其旋转一周的时间即为 60/2900 = 0.02069s，旋转 5 周的时间即为 5×60/2900 = 0.10345s；然后定义每一个旋转周期内计算步数，这里可以理解为定义叶轮每旋转几度计算一次，比如本例中叶轮每转 4°计算一次，其时间即为$\frac{4\times 转速}{360}\times 5\times 60=0.001149\text{s}$；最后单击【Apply】按钮，完成非定常计算的瞬态设置。

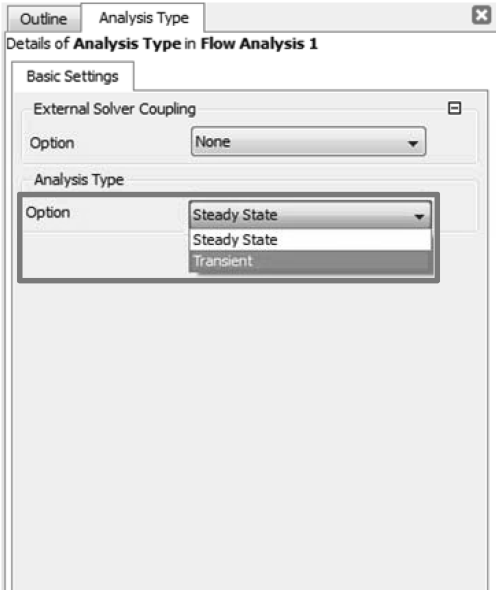


图 4-27　非定常计算设置界面

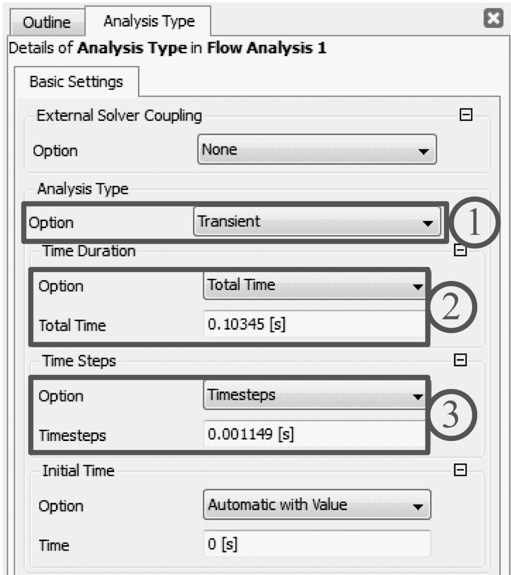


图 4-28　计算定义步骤

2）数据交界面模型修改：对于非定常数据的交界面设置不同于定常计算设置，其关键在于动-静计算域交界面的连接模型设置不同。在离心泵的动-静计算域交界面上双击，本例中为 Interface1 和 Interface2，弹出如图 4-29 所示的标签。在交界面的连接模型【Interface Model】仍然选为【General Connection】；但坐标系变换【Frame Change/Mixing Model】的【Option】选为【Transient Rotor Stator】；其余设置均与定常设置相同；单击【Apply】按钮完成动-静计算域非定常计算的数据交界面的定义。

3）求解器参数修改：双击模型树上的【Solver Control】或直接单击工具条上的图标，左侧控制树弹出求解参数属性编辑标签，如图 4-30 所示。可以看到非定常的求解器参数与定

常计算的不同，主要不同点是对于瞬态时间项【Transient Scheme】以及内循环计算【Convergence Control】的定义。通常对于瞬态时间项【Transient Scheme】，我们可以接受系统的默认设置；内循环计算是针对每个时间步的求解次数，可以理解为每个时间步内都是一个定常计算，而内循环计算的次数【Min. Coeff. Loops】和【Max. Coeff. Loops】是对该定常计算的计算步数进行调整，一般非定常进入稳定计算后，每个非定常时间步内的计算很容易达到收敛值【RMS】1E-4，即内循环计算的次数可以很小，一般【Max. Coeff. Loops】设为10，【Min. Coeff. Loops】默认为 1 即可以保证每个非定常时间步内的收敛。收敛判据【Convergence Criteria】的【Residual Type】依然选为平均值【RMS】，并输入具体的值 1. E - 4；单击【Apply】按钮，完成非定常求解器参数的定义。

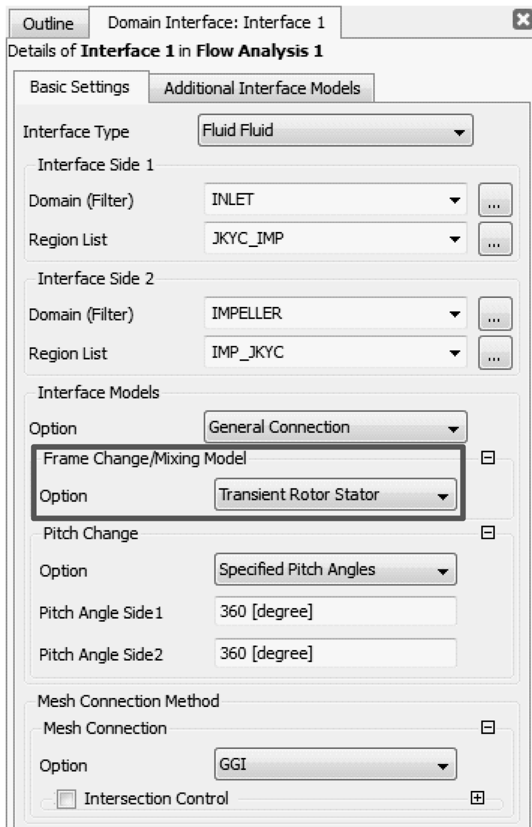


图 4-29　非定常动-静交界面设置

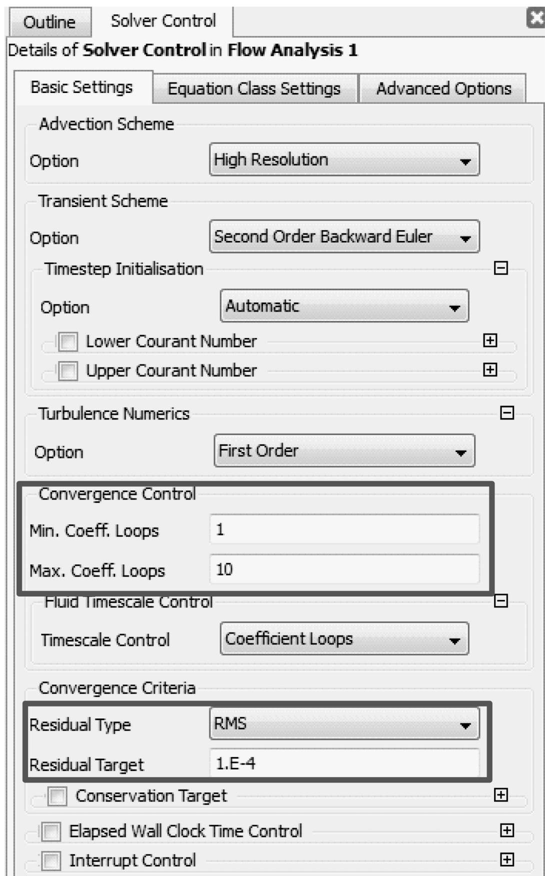


图 4-30　非定常求解器参数设置

4）瞬态计算数据设置：往往我们在做非定常计算的时候，需要查看中间计算过程的数据，即叶轮旋转过程中的流场信息，为达到这一目的，需要对瞬态计算数据的保存进行设置。双击模型树上的 Output Control 或直接单击工具条上的 ，左侧控制树弹出求解参数属性编辑标签，如图 4-31 所示。在弹出的对话框中，选择【Trn Results】标签，如图 4-32 所示，单击 新建一个瞬态数据保存，一般可以接受系统默认设置，只对【Output Frequency】进行改变，在下方的【Option】选项里选择【Every Timestep】或【Time Interval】。

【Every Timestep】意味着非定常的数据在每个非定常计算步就保存一次，本例中为每叶轮旋转 4°保存一次，即为每$\frac{4\times5\times60}{转速\times360}=0.001149$s 保存一次瞬态结果，一般不推荐这样的设置，这是考虑到非定常数据会生成非常多的文件，占据大量的硬盘空间。一般我们只需要获得叶轮几个关键旋转位置的流场，比如每叶轮旋转 20°获得一次流场，可以选择【Time Interval】，在下方的输入框中输入具体的时间，本例中即为$\frac{20\times5\times60}{转速\times360°}=0.005747$s。然后单击【Apply】按钮，完成非定常数据保存的设置。

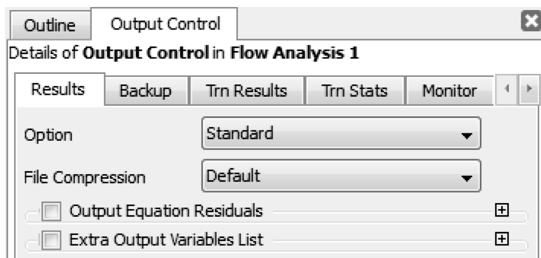


图 4-31　非定常求解参数属性编辑界面

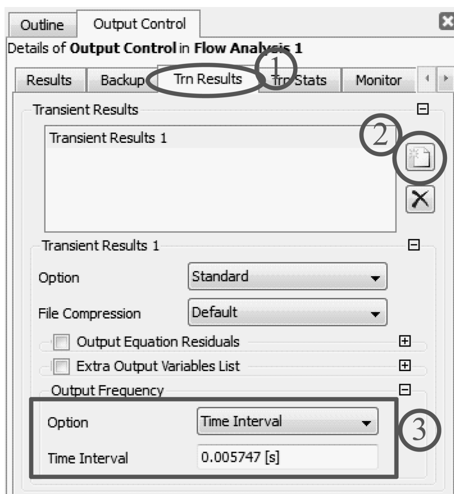


图 4-32　非定常瞬态计算数据编辑设置

5）非定常文件的计算设置：进行计算文件的保存，这与定常计算的操作相同，不再介绍。找到上步保存好的非定常 .def 文件，双击打开弹出定义计算界面，在进行非定常计算时通常需要初始流场。这里的初始流场即为定常计算的结果。所以非定常计算的基础是进行定常的计算。具体操作如图 4-33 所示，首先勾选【Initial Values Specification】，出现下方的【Initial Values 1 Settings】对话框，单击找到之前的定常计算结果即 .res 文件。同样网格较少的情况下不需要开启并行计算模式，开启并行计算的方法与定常计算开启并行方法相同。最后单击【Start Run】按钮开始计算。完成非定常文件的计算设置。

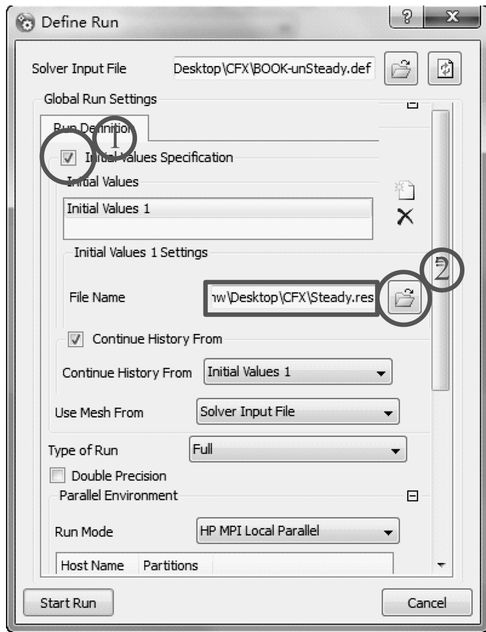


图 4-33　非定常文件的计算设置

4.3 叶片泵汽蚀计算

汽蚀计算通常是先进行无汽蚀的定常计算，然后以无汽蚀的计算结果为初始条件进行汽蚀计算。需要注意的是，进口条件必须是压力。汽蚀计算的设置在定常设置基础上增加以下几步：

1）添加汽化状态下的介质：在左侧模型树上选择【Materials】，右键单击【Insert】→【Material】，添加与液态介质相同温度的气态介质 Vapor，如图 4-34 所示。

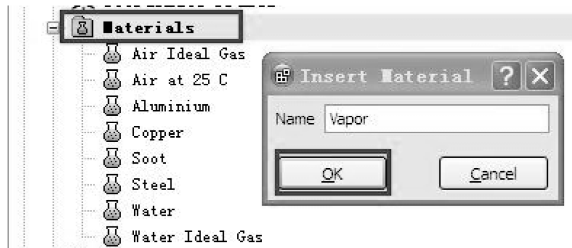


图 4-34　添加介质

先进行基本的设置，【Option】中选择默认的【Pure Substance】，单击【Material Group】后的 ...，在窗口中选择 Constant Property Gases、【Interphase Mass Transfer】和【User】三个选项，单击【OK】按钮，勾选【Material Group】下的【Thermodynamic State】，选择 Gas，即气体，单击【Apply】按钮，如图 4-35 所示。接下来定义材料的性质，【Option】中选择

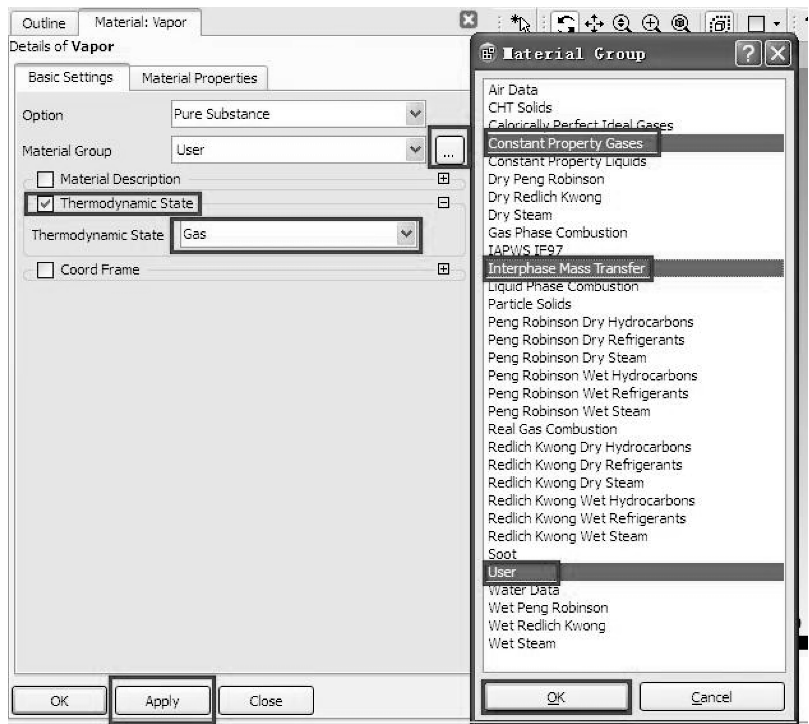


图 4-35　介质基本设置

默认的 General Material，单击【Thermodynamic Properties】后的⊞，输入该介质的摩尔质量和密度。勾选比热容选项，输入该介质比热容的值，类型选用默认的定压，单击【Apply】→【OK】，如图 4-36 所示。若所需的汽化状态下的介质已存在数据库中，则无须添加。直接在左侧模型树上选择【Materials】右键单击选择【Import Library Data】，调用如图 4-37 中的介质。

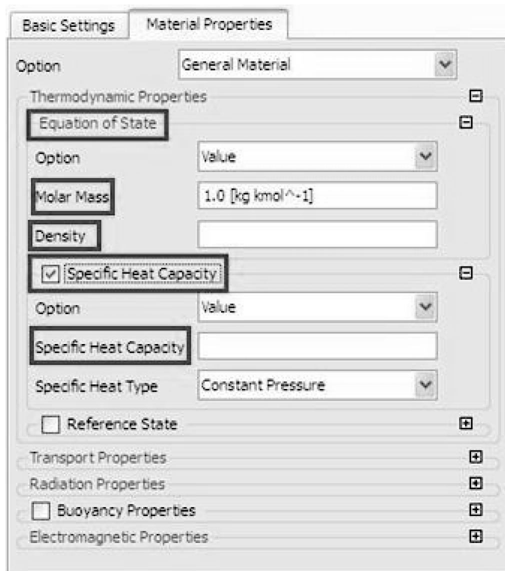


图 4-36　介质性质定义



图 4-37　数据库

2）设置计算域中的介质：将添加的介质加入计算域中，单击▢，定义名称 Fluid 2，单击【OK】按钮，设置 Fluid 2 为添加的气态介质，如图 4-38 所示。勾选【Multiphase】下的【Homogeneous Model】，【Mass Transfer】下选择 Cavitation ，【Saturation Pressure】中输入该介质的饱和压力，如图 4-39 所示。

3）设置体积分数：双击进口边界进行编辑，将液态介质体积分数【Volume Fraction】设置为 1，气态介质体积分数【Volume Fraction】设置为 0，如图 4-40 所示。

4）开始在一个大气压下的汽蚀计算：选中初始数值复选框，单击打开命令，选择无汽蚀情况下计算的 res 文件作为初始条件，如图 4-41 所示。

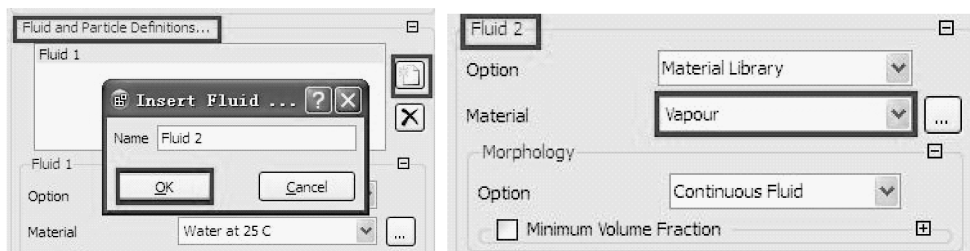


图 4-38　计算域中介质的基本设置

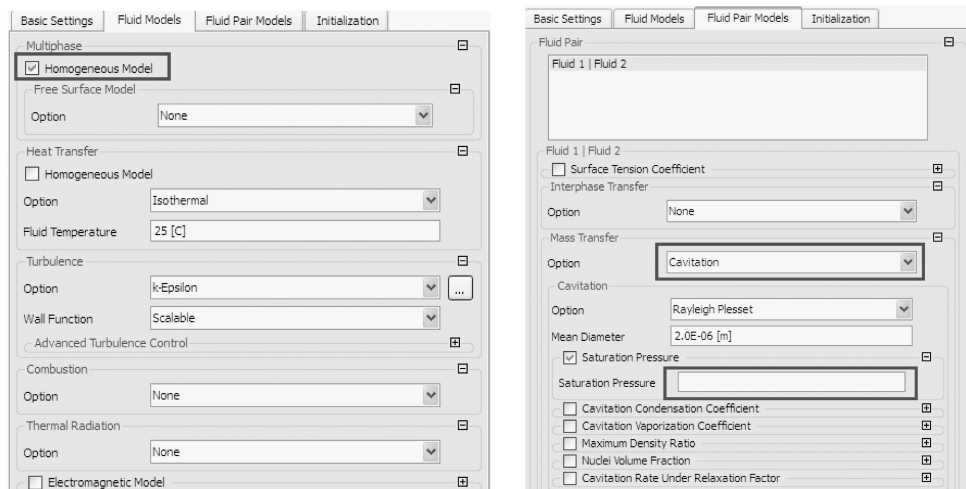


图 4-39　计算域中介质的模型设置

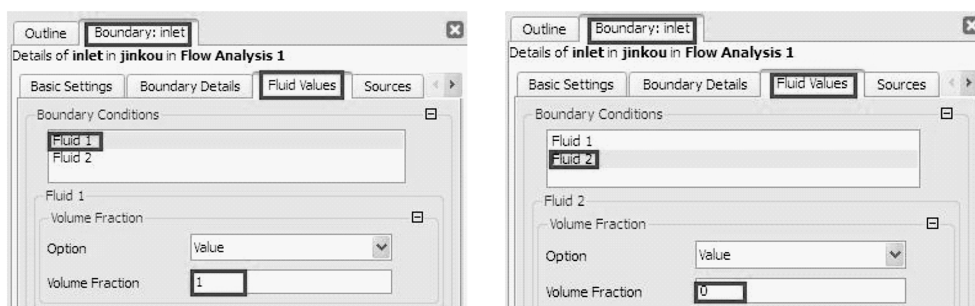


图 4-40　介质体积分数定义

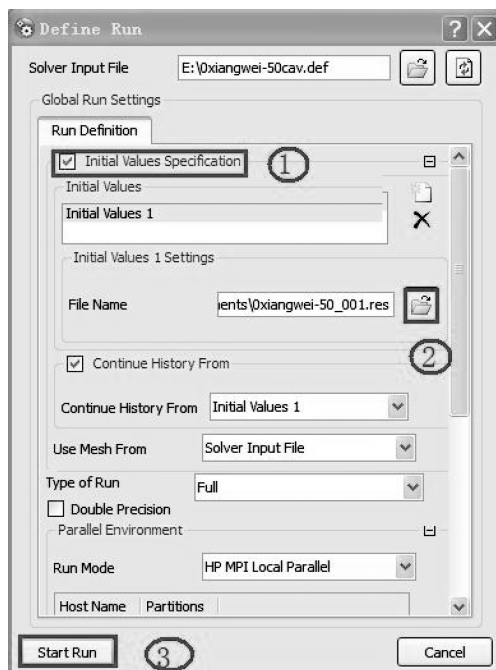


图 4-41　运行的设置

5）降低进口压力计算：在一个大气压条件下计算完成后，单击 ，对进口压力的值进行修改，如图 4-42 所示。单击保存按钮，然后单击 ，继续计算。降低进口压力的值根据扬程的变化进行调整，直至发生空化现象，即一般认为的扬程降低 3% 。

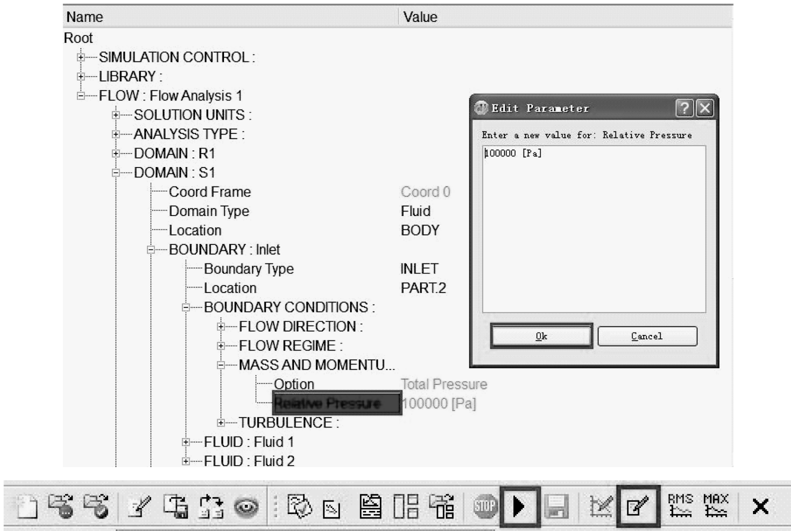


图 4-42　降低压力的设置

4.4　叶片泵过渡过程计算

过渡过程即运行状态瞬态变化过程，如离心泵开机启动过程和关机停泵过程就是最常见的过渡过程。由于启动过渡过程和停泵过渡过程在 CFX 中实现的思路相同，所以本例仅以启动过渡过程计算加以说明。过渡过程计算其实质也是非定常计算，大部分设置与非定常计算相同，这里不再赘述，但变量函数需要用户进行自定义（UDF），其具体操作如下：

1）函数自定义：过渡过程计算最重要的一步就是进行变量函数自定义。本节将在上节非定常基础上进行进一步设置。首先启动 CFX，在 CFX12. 0 launcher 界面上单击【CFX-Pre 12. 0】弹出【CFX-pre】界面，点击左上角的 按钮弹出【open case file】文件选项框，根据文件路径找到上节中保存的 . def 文件并打开，详细操作如图 4-43 所示。

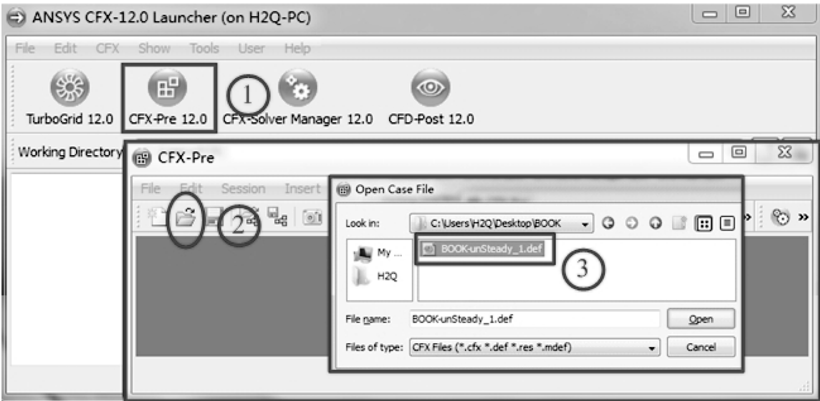


图 4-43　启动 CFX 前处理

打开 . def 文件进入到 CFX 前处理界面，如图 4-44 所示。双击【Expressions】即可进入函数定义界面，本例中假定启动过程只有转速 N 为变量，即泵开机启动到转速稳定状态过程中只有转速随时间变化，转速随时间变化函数由实验测量数据拟合得到，函数表达式为：$N=a+bx+cx^2$，式中 x 即为时间未知量，其中 a、b、c 为常数，$a=1.35$，$b=0.05$，$c=0.32$。进入到函数定义界面，右键单击【Expressions】插入公式，弹出【insert expression】对话框，即可输入公式名称，如 N（转速），然后单击【OK】进行该函数的详细定义。

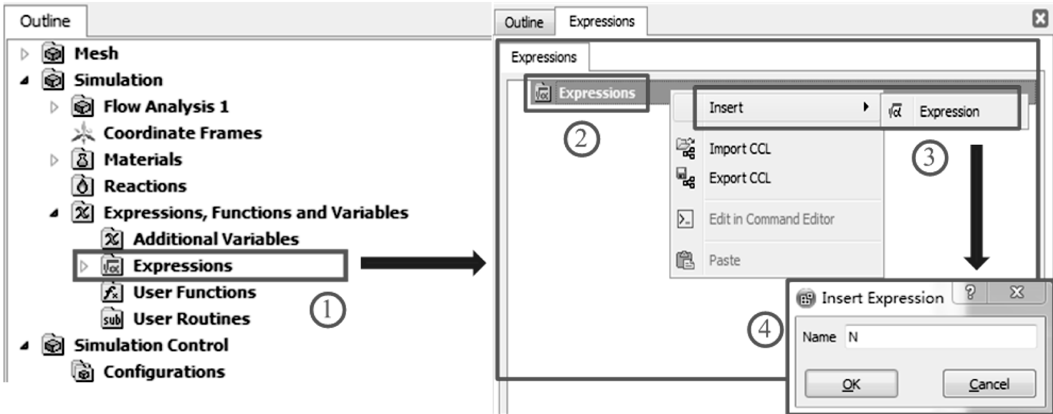


图 4-44　启用函数定义

转速 N 函数定义如图 4-45 所示，将转速函数表达式在对话框中书写出来。函数书写时注意格式，否则 CFX 会提示错误。定义的转速函数由于后面已有单位，所以表达式里面涉及的时间变量是不能有单位的，必须对时间变量进行无量纲化。这里定义时间的无量纲函数为 time，表达式如图 4-45 左下方所示，t 为 CFX 中默认的时间变量，利用 t/1［s］即实现了时间变量的无量纲化。表达式书写完成后点击【Apply】按钮，即可在函数公式列表中看到已定义好的函数。

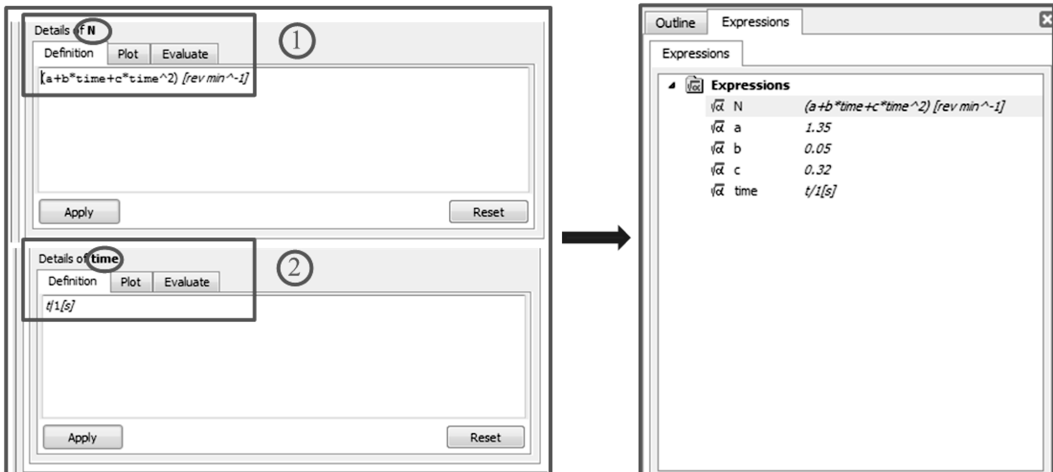


图 4-45　转速函数定义

函数定义还有一个很重要的作用就是可以在 CFX 求解过程中对设定的函数变量进行实时监测，如泵流体计算中经常需要监测扬程等变量，扬程函数定义如图 4-46 所示，在括号内输入两个相减运算的平面质量流量平均总压，CFX 中用函数 massFlowAve(ptotstn)@ 表示质量流量平均总压，用减号前面的@ 锁定出口界面，减号后面的@ 锁定进口界面，具体操作为：在两个@ 后面分别单击鼠标右键，弹出选择框，选择【Physics Locations】，再选择【2D】，图中出现最右边条目，分别选择出口截面（outlet）和进口截面（inlet）。式中 Wden 为计算流体密度，g 为重力加速度。

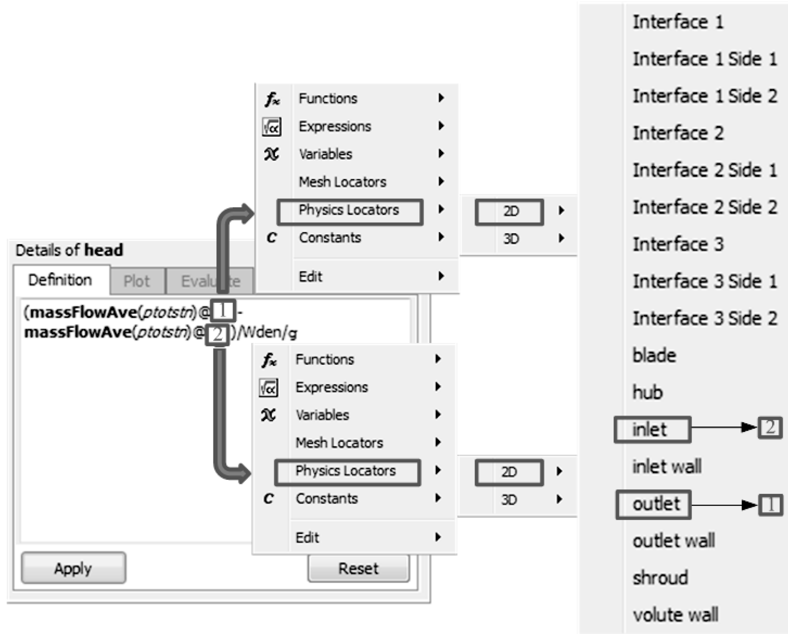


图 4-46　扬程函数定义

2）函数调用：函数定义完成后，还需要将函数调用到相关设置处。转速函数应赋给泵叶轮，并利用扬程函数设置扬程监测点。图 4-47 为叶轮转速设置图，叶轮其余设置与非定常计算设置相同。首先在 CFX 前处理结构树上找到【flow analysis 1】下的流体域【IMPELLER】，双击打开编辑框，编辑界面如图 4-47 所示，在【Domain Motion】下的【Angular Velocity】右边单击，此时空白框中即可输入函数公式，在空白框中单击鼠标右键，选择【Expressions】选项，再在右边的条目中选择定义的转速函数 N，单击下方的【Apply】按钮，转速函数调用完成。

监测点的设置有助于 CFX 求解过程中观察计算收敛性及准确性，扬程监测点设置具体操作如图 4-48 所示，双击结构树上的【Output Control】进行输出控制，进入设置界面，选择【Monitor】选项进行监测点设置，在【Monitor Points and Expressions】下面单击新建一个监测点，并在弹出的输入框中对监测点进行命名，监测点命名不能与公式中的命名相同，否则 CFX 会提示错误。这里给扬程监测点命名为“HEAD”，单击【OK】按钮，在出现的【Option】选项栏中选择【Expression】，并在下面的空白框中单击右键，并选择【Expressions】，最后出现定义的函数条目，选择扬程函数，扬程监测点设定完毕，单击【OK】

按钮，保存并退出设置。

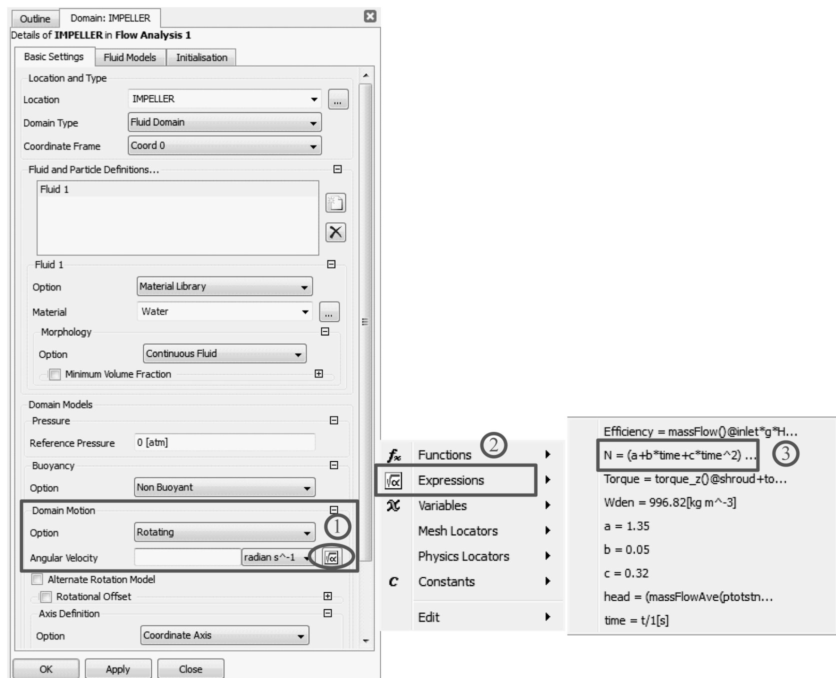


图 4-47　转速函数调用

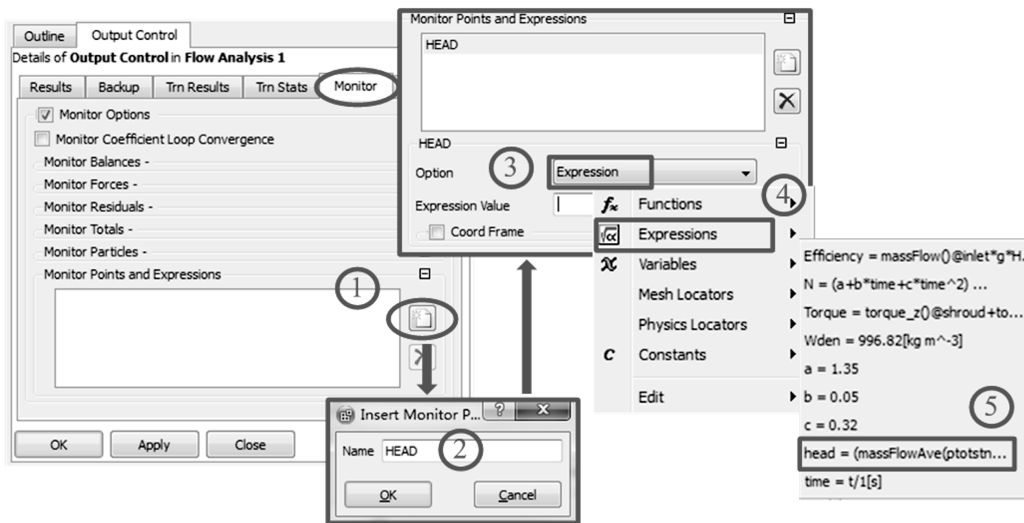


图 4-48　扬程函数调用

在普通非定常设置基础上完成函数调用之后，启动过渡过程前处理设置也就设置完毕了，运行文件保存及如何计算请参照 4.2 节非定常计算步骤。

第5章 CFD数值计算后处理

将数值计算结果形象直观地展示在他人面前是流动分析后处理的主要工作。ANSYS CFX 自身具备强大的后处理功能及可视化技术，能够显示各物理参数的云图、等值线图、速度矢量图、流动轨迹图等，同时还能计算扬程、扭矩、力矩及对应的力矩系数、流量等，并能生成简要的计算报告。除了应用 ANSYS CFX 自身所带的这些功能外，读者还可以借助 Tecplot 软件进行流动后处理分析，它是由美国 Tecplot 公司推出的功能强大的数据分析和可视化处理软件。Tecplot 简单易学，界面友好，可以进行科学计算，能将计算后的资料进行视觉化处理，便于更形象地显示一些科学数据，并且软件提供了丰富的绘图格式，包括 x-y 曲线图，多种格式的 2D 和 3D 面绘图以及 3D 体绘图格式，是一种传达分析结果功能非常强大的视觉化软件。

本章针对流动分析后处理的需要，将介绍利用 ANSYS CFX 及 Tecplot 进行模拟结果后处理的操作过程。通过利用 ANSYS CFX 及 Tecplot 对同样的模型泵计算结果进行后处理的讲解，帮助读者熟悉这两个软件的后处理功能，学会如何进行后处理操作来得到理想的分析结果。

5.1 叶片泵外特性计算方法

泵的扬程 H 为

$$H = (p_{\text{out}} - p_{\text{in}})/\rho g + \Delta z \tag{5-1}$$

式中 p_{out}——蜗壳出口总压；

p_{in}——叶轮进口总压；

Δz——进出口高度差。

泵的水力效率 η_{h} 为

$$\eta_{\text{h}} = \rho g Q H/(M\omega) \tag{5-2}$$

式中 M——叶片工作面、背面外表面的力矩之和。

泵的总效率 η 是输出功率 P_{e}（有效功率）与输入功率 P（轴功率）之比，即

$$\eta = P_{\text{e}}/P \tag{5-3}$$

轴功率 P 包括有效功率 P_{e}、容积损失功率 P_{v}、水力损失功率 P_{h}、叶轮圆盘摩擦损失功率 ΔP_{d}以及轴承和密封的损失功率 P_{m}，即

$$P = P_{\text{e}} + P_{\text{v}} + P_{\text{h}} + \Delta P_{\text{d}} + P_{\text{m}} \tag{5-4}$$

$P_{\text{e}} = \rho g Q H$；轴承和密封的损失功率 P_{m}约占有效功率 P_{e}的 3% 左右；则可以推导出

$$\eta = \frac{1}{\frac{1}{\eta_v \eta_h} + \frac{\Delta P_d}{P_e} + 0.03} \tag{5-5}$$

$\eta_v = 1/(1 + 0.68 n_s^{-2/3})$；$\Delta P_d = 0.35 \times 10^{-2} \times k\rho\omega^3 R^5$，其中 $k = 0.8 \sim 1$。

5.1.1 扬程计算

如图 5-1 所示，在【Calculators】标签下单击【Function Calculator】，弹出【Function Calculator】设置面板。按图示设置【Function】为 massFlowAve（平均质量流量），【Location】选择 Outlet，【Variable】选取 Total Pressure in Stn Frame（总压）。设置好后单击左下角【Calculator】按钮，在【Function Calculator】面板下方的【Result】窗口中就会显示水泵出口总压计算结果，同理，【Location】选择 Inlet 时计算可得进口总压值，通过式（5-1）即可计算出泵的扬程 H。

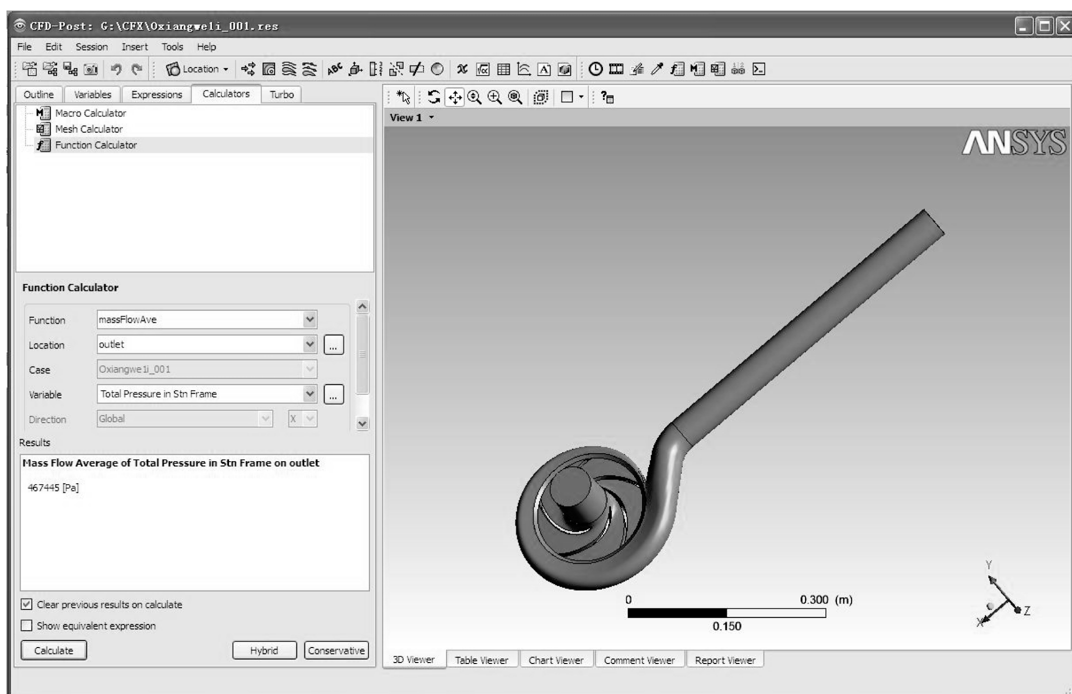


图 5-1 扬程计算

5.1.2 效率计算

在【Calculators】标签下单击【Function Calculator】，弹出【Function Calculator】设置面板，如图 5-2 所示。按图示设置【Function】为 torque（扭矩），【Location】选择叶轮区域中的 blade，选取 Z 轴作为叶轮区域旋转轴（根据实际选取旋转轴），设置好后单击左下角【Calculator】按钮，在【Function Calculator】面板下方的【Result】窗口中就会显示作用在叶片上的扭矩值。同理【Location】选择叶轮区域中其他部件时亦可计算得到作用在该部件上的扭矩，将各旋转部件计算所得到的扭矩值进行代数相加即可得到作用在叶轮区域上总体

扭矩值 T（注意方向选择与叶轮旋转方向不一致时会出现负值，此处直接取绝对值即可），按式（5-2）即可计算得到泵的水力效率。

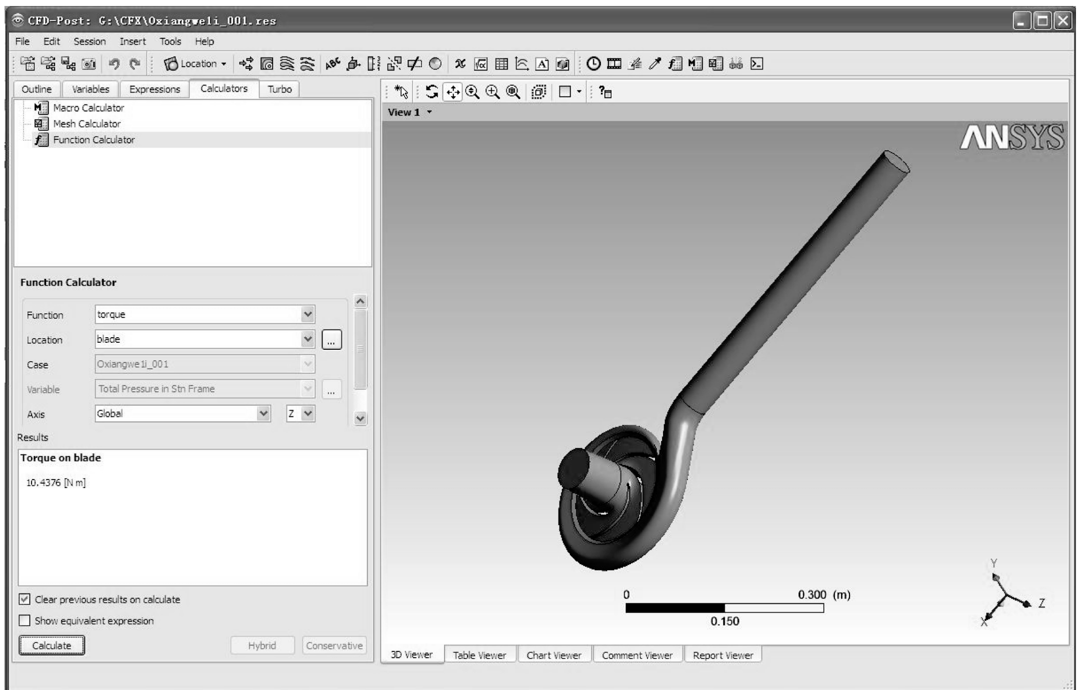


图 5-2　效率计算

5.1.3　汽蚀余量计算

在进行汽蚀计算时，通过公式可计算得到在一定进口压力下的装置汽蚀余量（NPSH）$_a$，CFX 计算可得到该压力所对应的泵扬程 H。将进口压力值不断降低直至发生汽蚀现象，在相应的压力下得到（NPSH）$_a$和 H，将不同压力下的装置汽蚀余量作为横坐标，扬程作为纵坐标构成泵汽蚀特性曲线。一般认为当扬程降低 3% 时就发生了汽蚀，此时的（NPSH）$_a$为泵汽蚀余量的临界值，记为（NPSH）$_{cr}$。实际计算中常用（NPSH）$_{cr}$代替泵必需汽蚀余量（NPSH）$_r$。工程上为安全起见会加上一个安全余量 K，可获得泵的允许汽蚀余量：[NPSH_r] =（NPSH）$_{cr}$ + K，常取 $K = 0.3 \sim 1.0\text{m}$。

5.1.4　CFX 函数开发

CFX Expression Language（CEL）是在 CFX 里面广泛应用的一种解释性、申明性语言，通过创建方程用于 CFX 的前处理和后处理，例如用于复杂变量的定义、边界条件的指定等。在不借助外部 Fortran 程序的条件下实现用户自身数值模拟的目的。CEL 在 CFD-Post 中有如下作用：

1）创建新的变量表达式；
2）基于变量表达式可在 CFD-Post 中进行任何数值参数的设置；
3）可通过表达式建立用户自定义变量；
4）直接在变量表达式中使用后处理器自带的一些函数；
5）可直接指定变量的单位；
6）可使用用户自定义的坐标系框架进行 CEL 函数的编辑。

下面将通过模型泵扬程计算的例子来说明 CEL 使用过程。

首先单击【Expressions】按钮随之出现带公式符号的 Expressions ，右键单击后出现如图 5-3 所示菜单，单击 New … ，并在随之弹出的对话框中键入 H，单击【OK】按钮，这样就建立了新的变量 H。

接下来对变量 H 进行表达式的创建，如图 5-4 所示，选择 massFlowAve（平均质量流量）作为计算中的一个函数，在图 5-5 中对 massFlowAve 函数选择 Total Pressure in Stn Frame（总压）作为输入变量。在图 5-6 中对 massFlowAve 函数选择 outlet 作为函数计算作用面，同理选择 Inlet 面作为 massFlowAve 函数计算作用面，将进出口面的计算结果相减并除以流体密度和重力加速度就得到了最终变量 H 的表达式，如图 5-7 所示。单击【Apply】按钮后在【Value】框里就会显示变量 H 的值为 37.4117m，同时在【Expressions】按钮下拉框中显示变量 H 计算表达式。在图 5-7 变量创建菜单中若选择 Edit In Command Editor 则会弹出如图 5-8 所示 CEL 命令编辑窗口，刚刚编辑生成的变量 H 会显示在里面，在这个窗口下包含 Expressions 中所有变量表达式并且可以相应的进行修改。

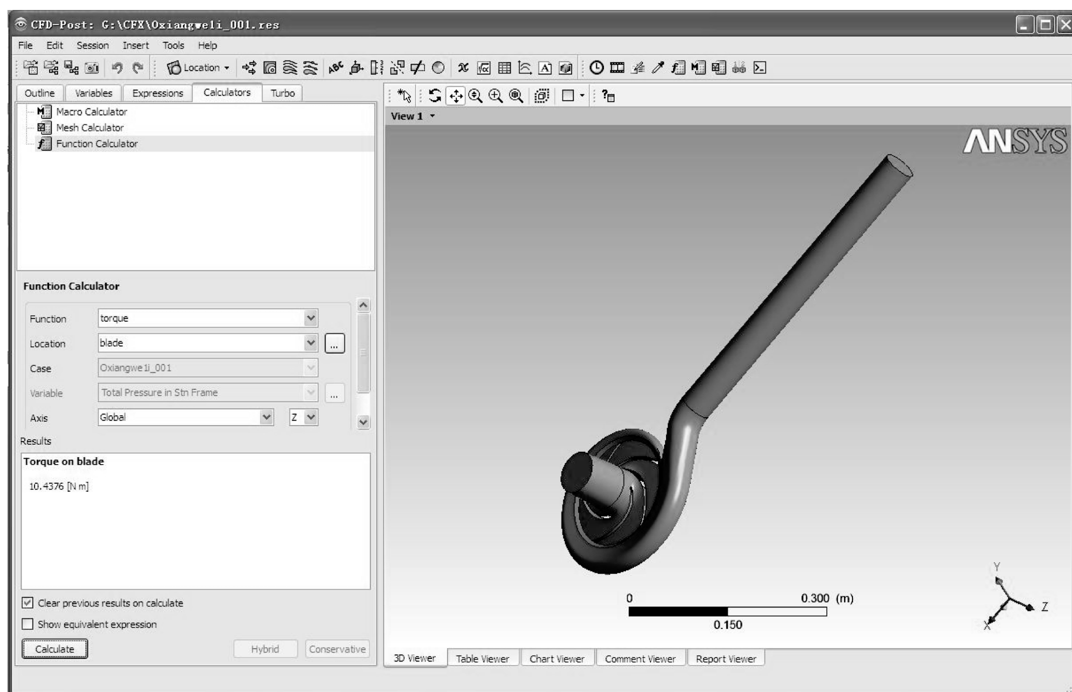


图 5-3　变量创建菜单

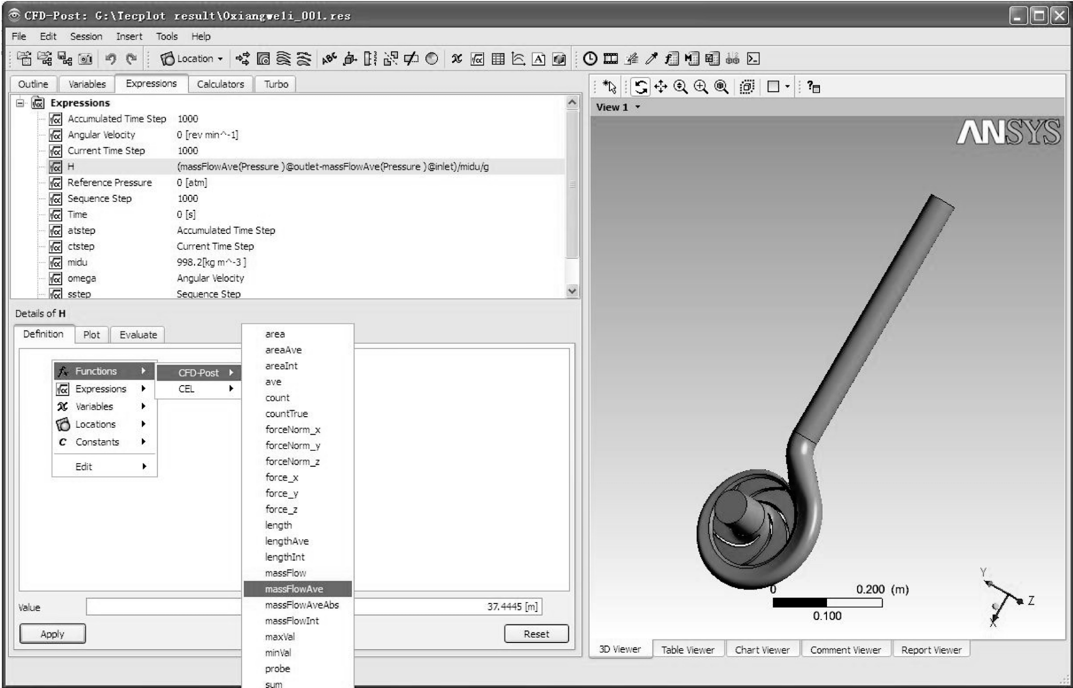


图 5-4　选择变量表达式函数

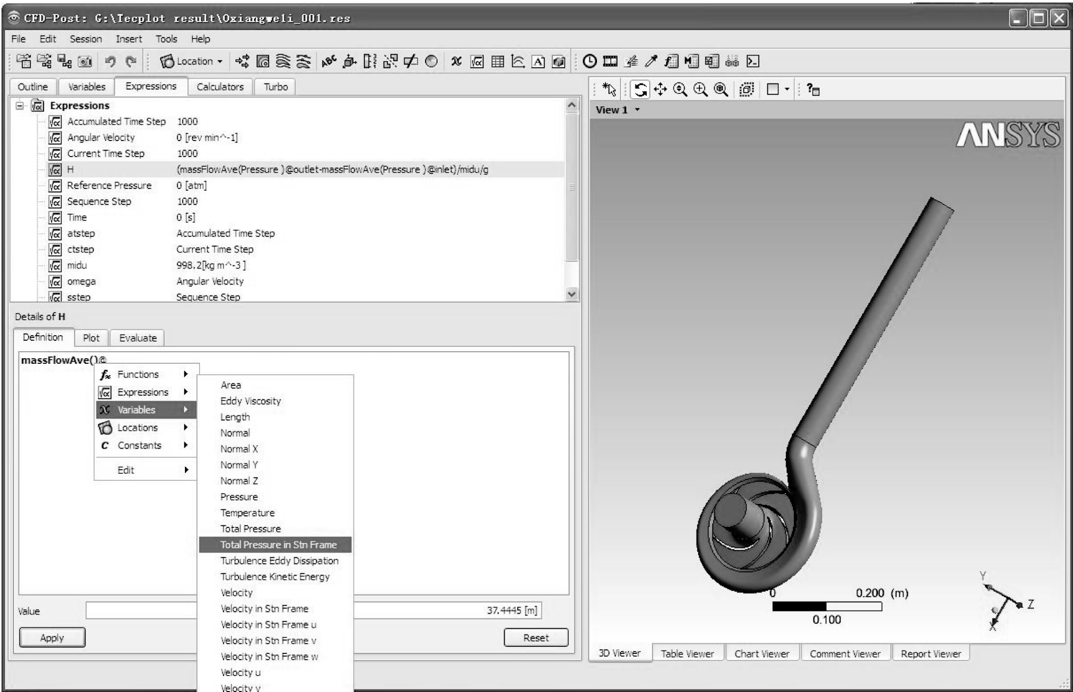


图 5-5　选择表达式变量

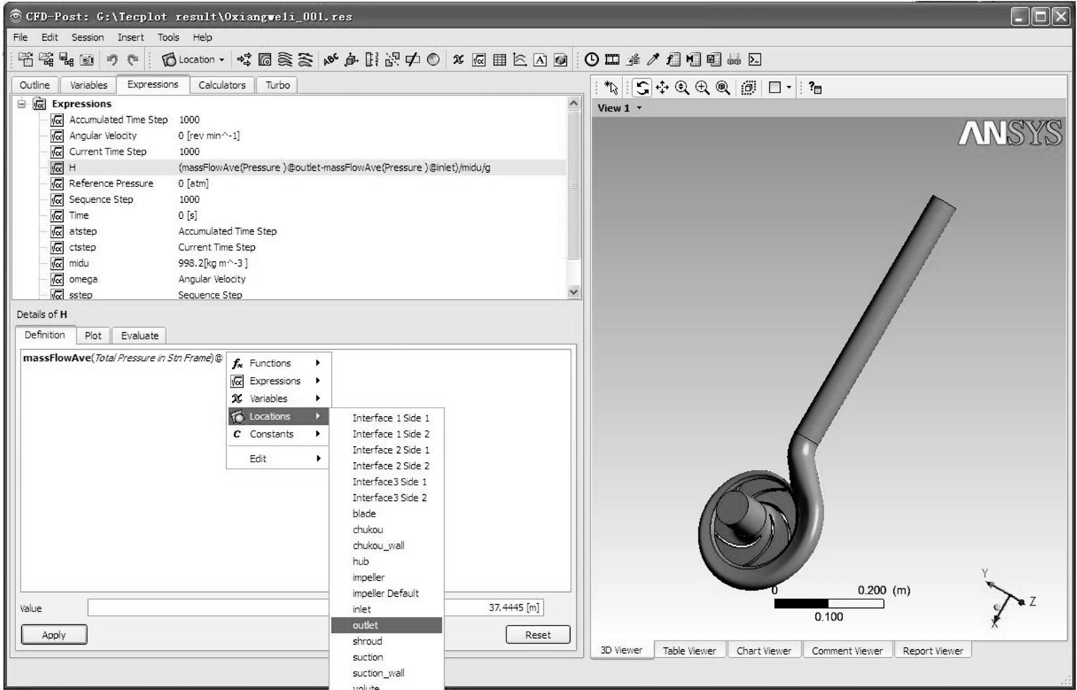


图 5-6　选择表达式作用面

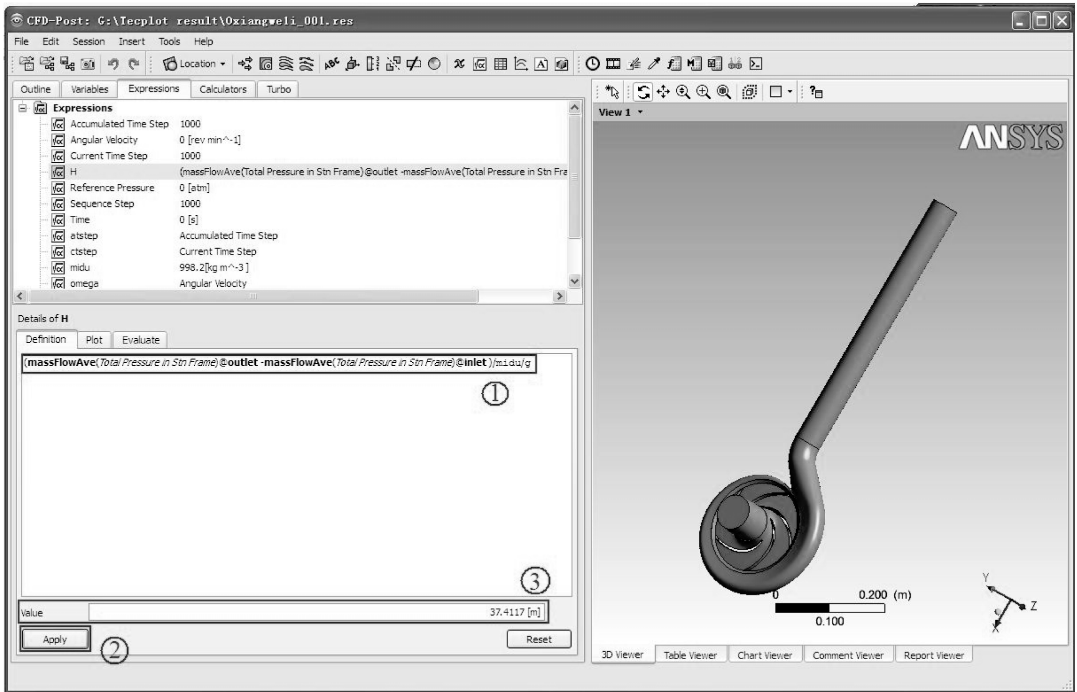


图 5-7　完成表达式编辑

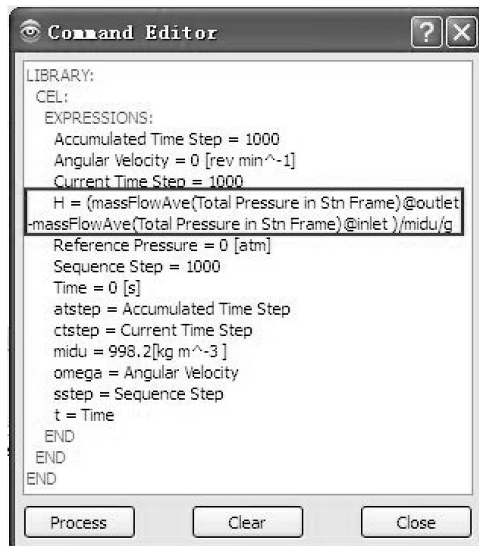


图 5-8　命令编辑窗口

5.2　CFX-Post 后处理

ANSYS CFX 自身具有强大的后处理能力，主要体现在图形可视化技术上。ANSYS CFX 的后处理功能由 CFX -Post 完成，下面对其相关后处理功能进行详细介绍。

5.2.1　导入结果文件并创建切平面

在【CFX-Launcher】中单击 CFX-Post 按钮，打开 CFX-Post 窗口。首先将模型泵计算结果文件导入进来，单击【File】→【Load Result】，如图 5-9 所示。

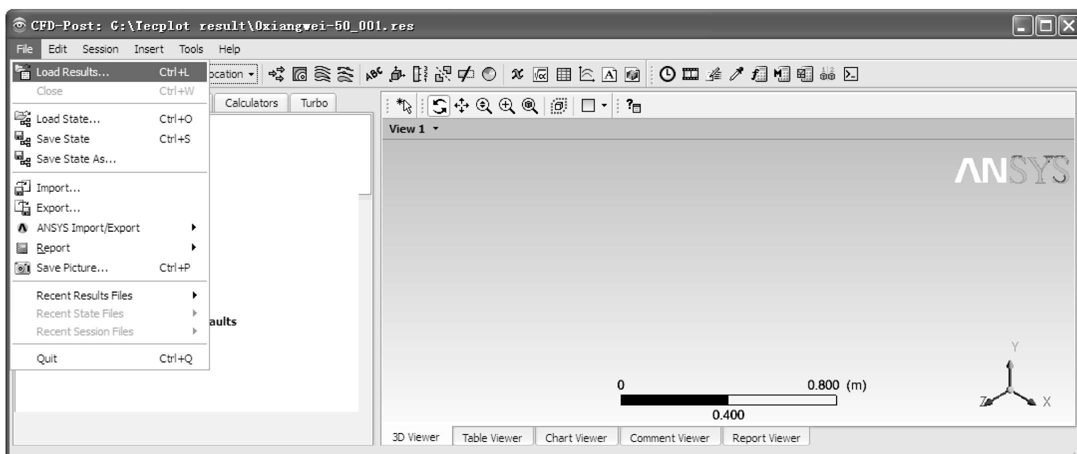


图 5-9　CFX-Post 导入计算结果文件

在图 5-10 弹出的对话框中找到结果文件所在目录，单击【Open】按钮，在接下来弹出的窗口中选择要导入的文件之后即可导入结果文件。CFX-Post 载入计算结果后，会以线框的方式显示几何模型。

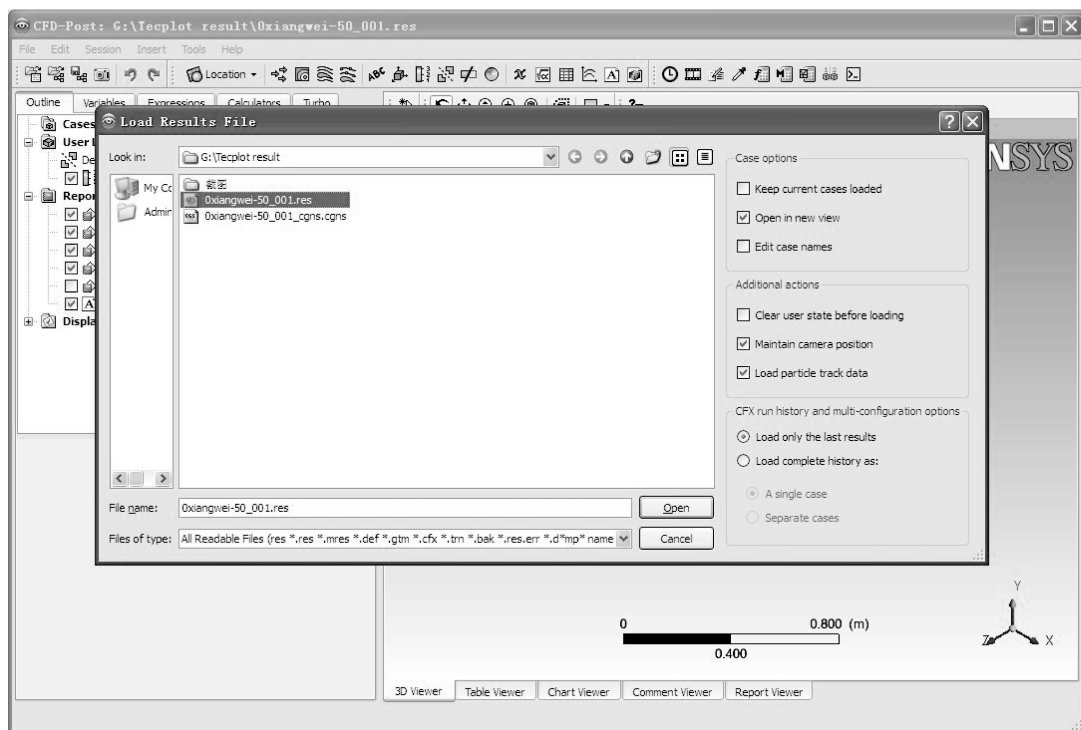


图 5-10　打开计算结果文件

一般显示叶片泵内部流动状态的各种云图、矢量图都是建立在切平面的基础上，故首先学习如何做切平面。如图 5-11 所示，单击【Location】按钮，菜单中列出来的点、线、平面、体、曲面等都是可以用来创建的几何量。选择 Plane，建立一个平面，这就实际上建立了一个计算域的切平面或者说是计算域剖面。

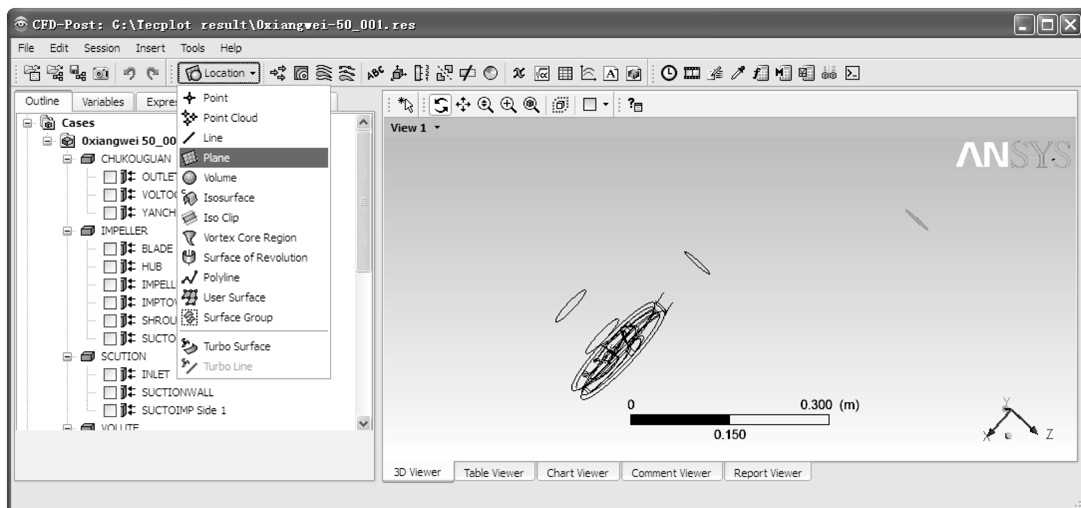


图 5-11　创建切平面

选择 Plane 后，在弹出来的对话框中输入切平面名称。如想看到中间截面的流动状态，其对应一个 XY 平面，故输入 XY 面，单击【OK】按钮。

图 5-12 中左下角出现了切平面设置信息。在【Domains】中选择切平面所要切割的区域，一般都选择默认的 ALL Domains。在 Method 中可以选择切平面的方向，要建立一个 XY 平面，所以选择 XY Plane 方法。对于切割位置的 Z 坐标值，可以直接键入，也可以通过拖动滑块确定，其默认的单位为 m。输入 0. 039，单击【Apply】按钮，即生成了切平面。

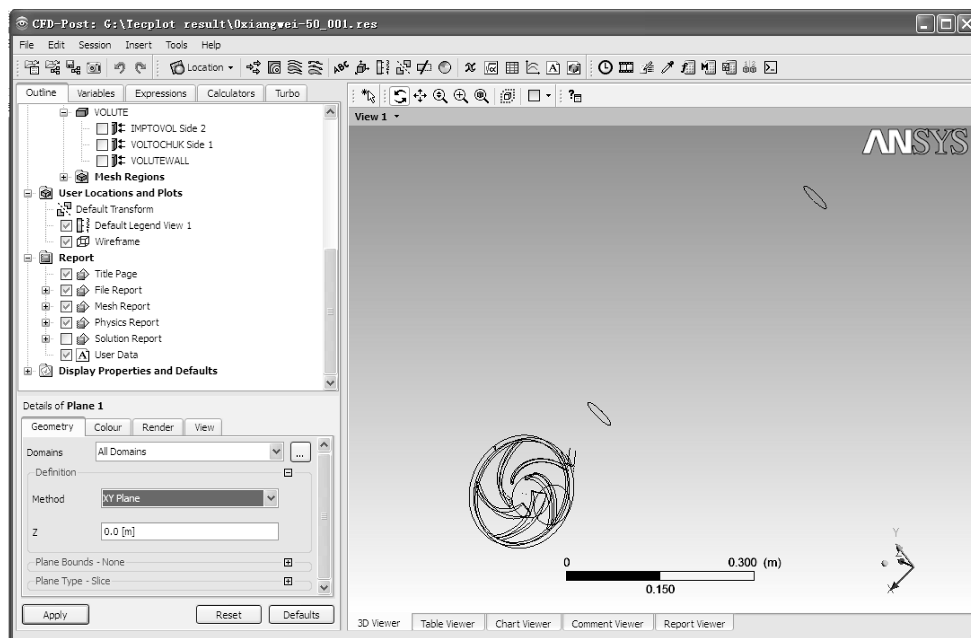


图 5-12　切平面设置

图 5-13 为生成的切平面，切平面生成后在【User Locations and Plot】树型结构下就出现了 XY 面，并且它的前面还出现了一个复选框，可以看到该复选框选上切平面可见，取消选

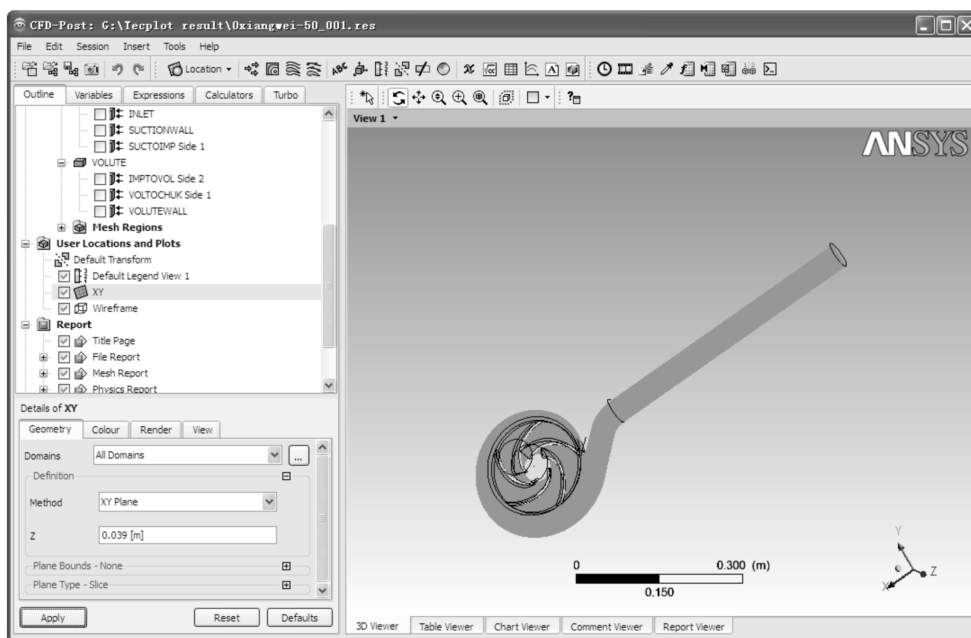


图 5-13　生成的切平面

择则将切平面隐藏。

5.2.2 创建压力云图与等值线图

接下来将在切平面上显示压力的云图与等值线图，云图和等值线图一般用来表示标量场。创建云图可以从菜单栏选择【Insert】菜单，然后在下拉菜单中单击【Contour】，也可以直接单击工具栏上图标启动。在弹出来的对话框中给新的【Contour】起个名字，此处键入 XY Pressure，单击【OK】按钮。

单击【OK】按钮后就出现了【Contour】设置面板，如图 5-14 所示。面板中，【Domains】选择默认的 ALL Domains 表示显示全部切平面上的压力分布。【Locations】选择 XY，【Variable】选择 Pressure。将最下面的# of Contours 的值改为 19，这是控制压力云图显示的精度，这里将压力范围平均分成了 19 份，一共有 18 个压力值，对应的压力云图显示有 18 条等压线，单击【Apply】按钮。

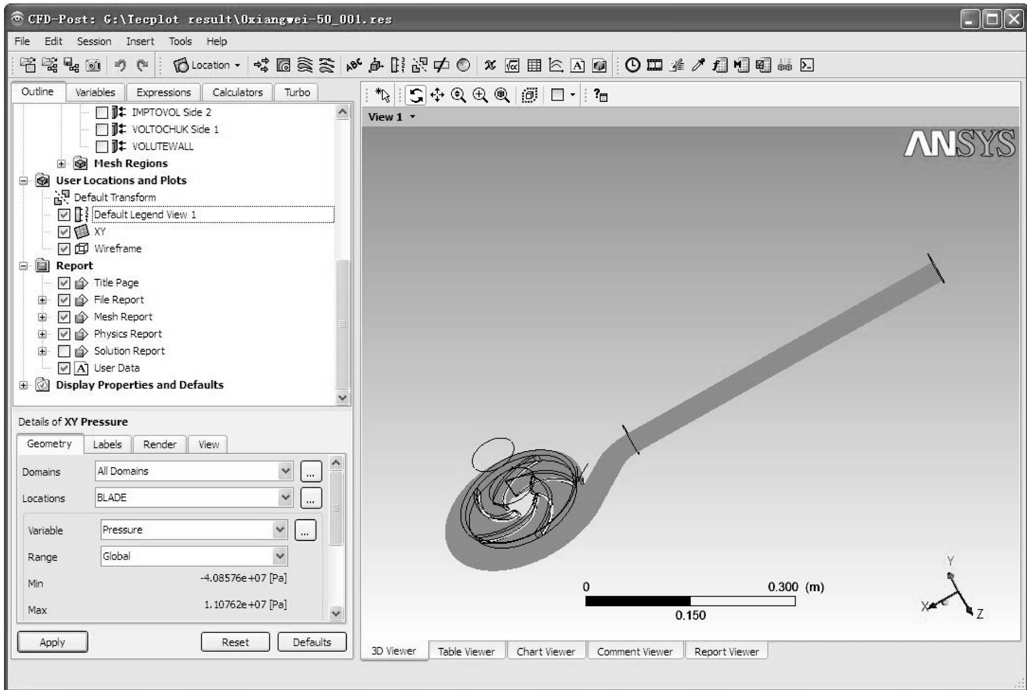


图 5-14 云图设置面板

图 5-15 为 XY 平面上的压力云图，可以看出叶轮区域压力梯度较大，蜗壳及出水管处压力梯度相对较小。叶轮流道内压力面的压力值及压力梯度值要明显大于吸力面值，这种趋势在靠近隔舌的流道更为明显。蜗壳流道内压力分布梯度较小，但在靠近隔舌的区域流动非常紊乱，甚至有些地方还产生了漩涡。出水管内压力分布较均匀，起到了把蜗壳出口水流的动能转换成出水管中水流压力能的作用。

等值线图也是常用于各种场量的分布图，其优点在于以等值线的形式给出了场量的分布，等值线数值的大小表示该点处场量的大小，等值线的疏密表示该区域场量变化的快慢。实质上，等值线图和云图类似的，只不过等值线图只画出了某个值的连线，而云图则在连线中填充了颜色。

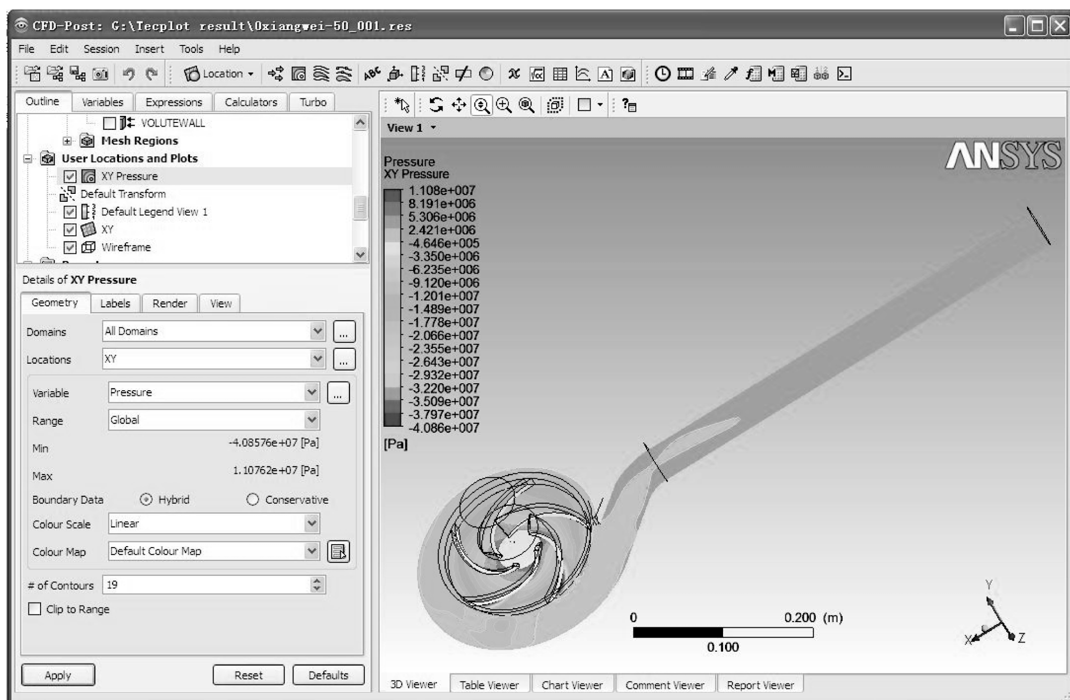


图 5-15　XY 平面压力云图

如图 5-16 所示，在刚刚创建的 XY 平面压力云图设置面板中，单击【Render】标签，将【Show Contour Bands】前勾选去掉，并保持【Show Contour Lines】前勾选，单击【Apply】，就得到了如图 5-17 所示 XY 平面压力等值线图。

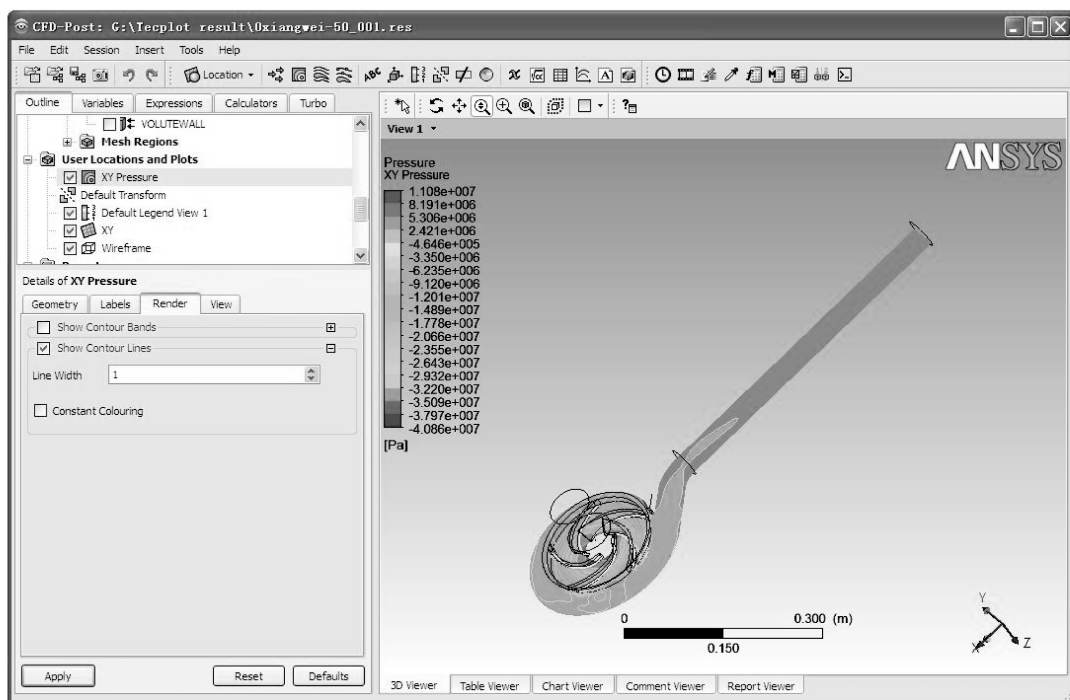


图 5-16　等值线图设置

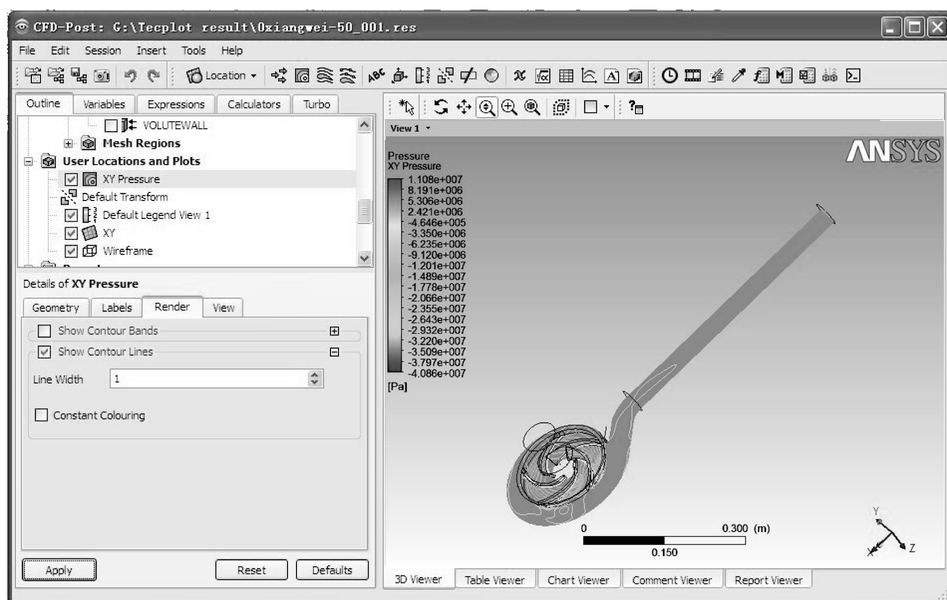


图 5-17 等值线图

5.2.3 创建速度矢量图

创建矢量图可以在菜单栏单击【Insert】→【Vector】，也可以直接单击工具栏上 图标启动。在弹出来的对话框中给新的矢量图起个名字，此处键入 XY Velocity，单击【OK】。单击【OK】后就出现了 Vector 设置面板，如图 5-18 所示。面板中，【Domains】选择 All Domains。【Locations】选择 XY，【Variable】选择默认的 Velocity，然后其他的量都保持默认值，单击【Apply】按钮生成了速度矢量图，如图 5-19 所示。

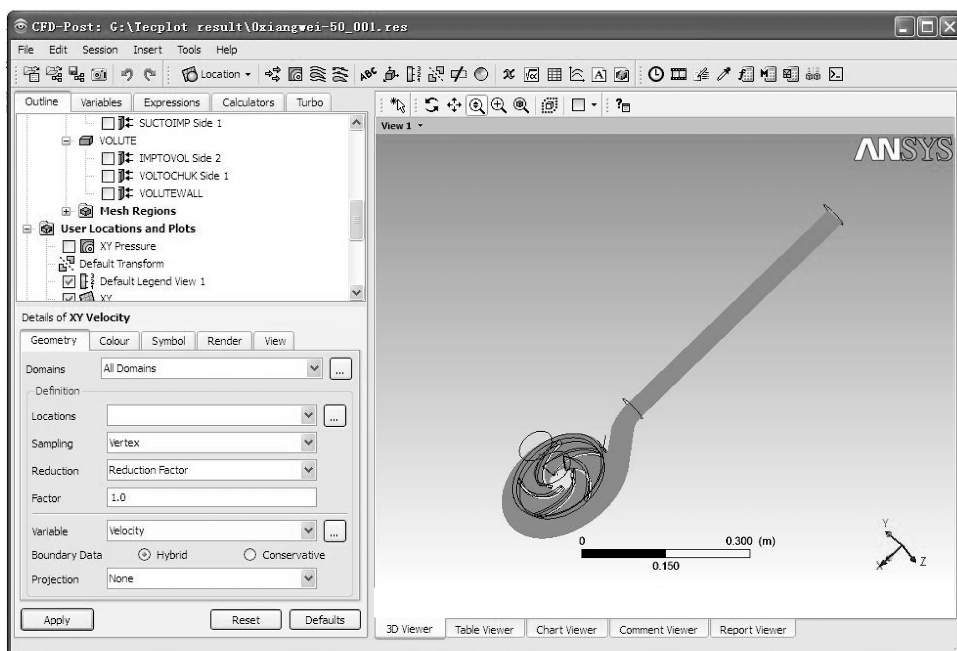


图 5-18 速度矢量设置

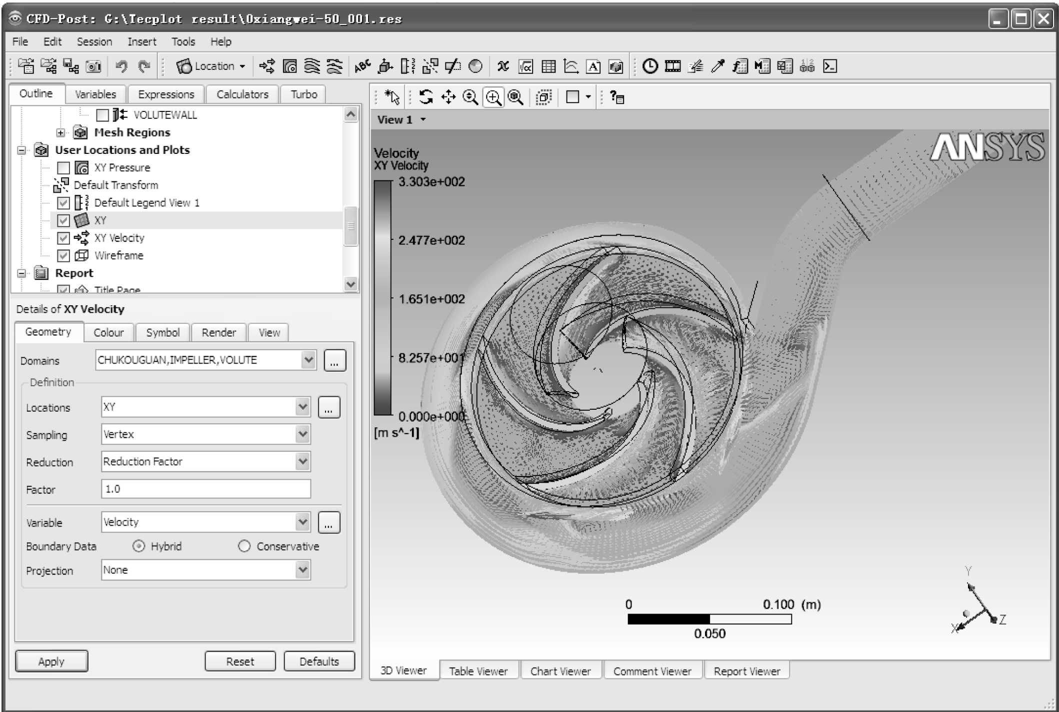


图 5-19　速度矢量图

从图中可以看出叶轮区域内工作面流体速度明显要大于吸力面，并且在靠近隔舌附近的几个流道这种差异更为明显。在图 5-20 所示区域中，由于紊乱的流动产生了回流甚至是漩

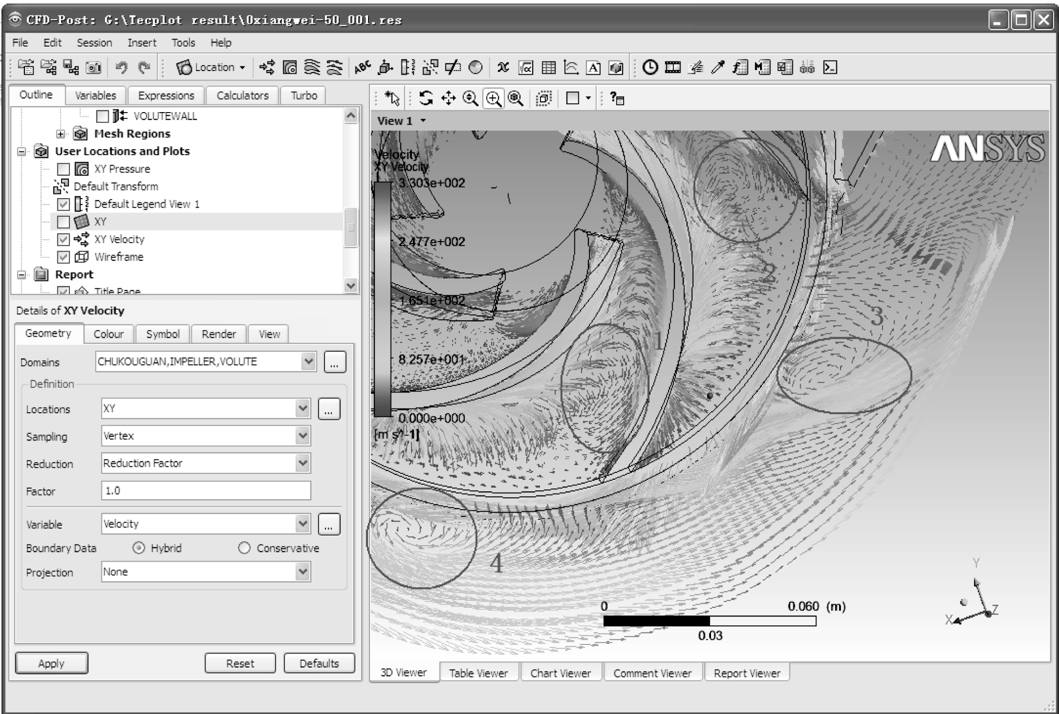


图 5-20　速度矢量图上的涡

涡，图中 1、2 号涡就是在靠近隔舌叶间流道中形成的。在蜗壳第七、八断面附近有着很大的冲击速度，并且产生了 3、4 号涡，蜗壳内的流动如此紊乱导致了大量的水力损失。

5.3　Tecplot 简介

如图 5-21 所示，启动 Tecplot 之后，可以看到 Tecplot 的主功能界面，界面由菜单栏、工具栏、工作区、状态栏和状态栏 4 个部分组成，分别对应图中 1 到 4。

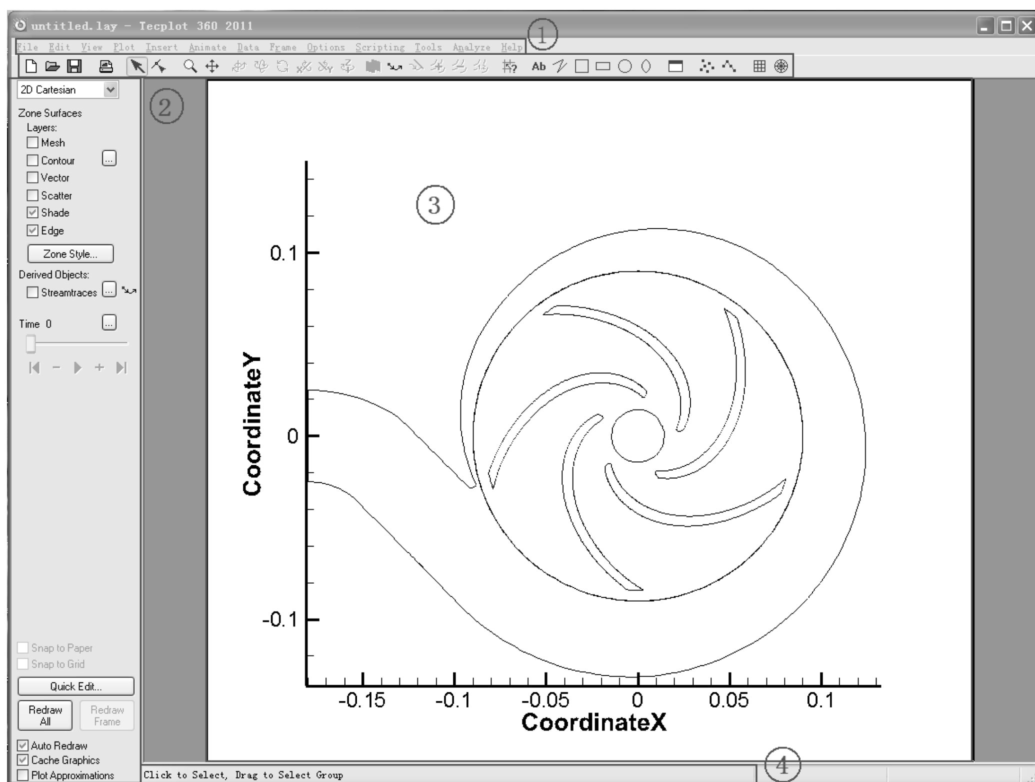


图 5-21　Tecplot 的主功能界面

5.3.1　菜单栏

菜单栏中每一菜单下都有其对应的菜单命令选项，通过菜单栏可以完成 Tecplot 的大部分功能，并且每个菜单下面都有对应的二级子菜单去实现相应的功能。

（1）文件菜单　文件菜单用于进行文件的读写、打印、输出曲线、记录宏、设定记录配置和退出等，其中：

Newlayout：主要用于删除现有的图形，以备重新调入一个 Tecplot 图。

Open layout：弹出对话框，可以在确切的路径下加载一个先前曾保存过的图文件。

Save layout as：以一个新的文件名来存储先前曾保存过的图形。

Load Data File（s）：用于载入多种格式的数据以进行数据的处理，载入过程中数据格式的选取如图 5-22 所示。

（2）编辑菜单　编辑菜单可以实现剪切、复制、粘贴、清除、上提与下压显示顺序、修改数据点等功能，来对绘图进行重排列、复制、删除某图块，而不需要重新建立一个绘图，其中：

Select all：在弹出的对话框中为选择框、图域、文本、几何、线条等提供选择。

Quick Edit：用于对工作区的网格、云图、矢量图等进行快速编辑。

Push：把已选择的项目推到当前图片堆的底部。往往 Tecplot 图是把位于图片堆的从底部到顶部的图块依次显示在屏幕上的。如文本、几何体、二维或 XY 网格、文本框这几种类型都有可能被推进堆内。

Pop：用于把现有图片堆中的已选项从堆中取出，而如文本、几何体、二维图形或 XY 网格域、文本框就有可能被弹出。

Copy layout to clipboard：把当前的图案复制到剪贴板上去。

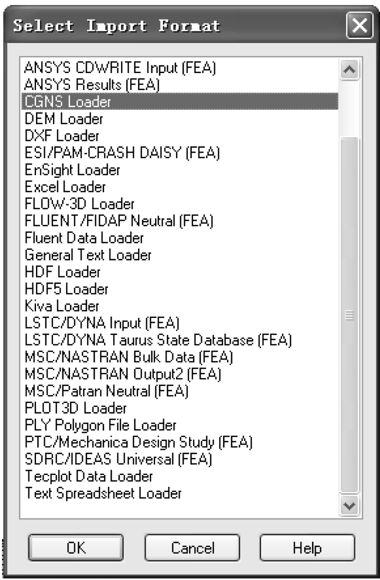


图 5-22　数据的格式选取

（3）视图菜单　视图菜单用来控制观察数据位置，包括比例，范围，对视图进行缩放、调整其大小，还可以用来进行不同帧之间的粘贴功能，其中主要有：

Redraw All：用以刷新当前的图片框，以显示出所有的那些悬而未决的变化。

Zoom：可以对图形进行交互的放缩。

Fit toFull Size：放大图形使之填满整个图片框。

Center：可以把文本框的图形置于中心位置。

Last：可以恢复 Tecplot 视图栈中先前的一个视图。

Workspace：用以对工作区进行视图大小等调整。

（4）绘图菜单　如图 5-23 所示绘图菜单用于控制轴的设置、图域类型、流线、云图（等值线或面）、矢量、离散点、颜色等设置，其中：

Axis：用于对工作区中坐标轴标题、线型、变量范围和图例等的设置，如图 5-24 所示。

Assign XY：用于对坐标轴进行相应的变量的选择。

Zone style：可以对工作区内图形进行网格、云图、矢量图等的设置，并且每个设置下都有相应的功能选择用以去调整图域内图形，如图 5-25 所示。

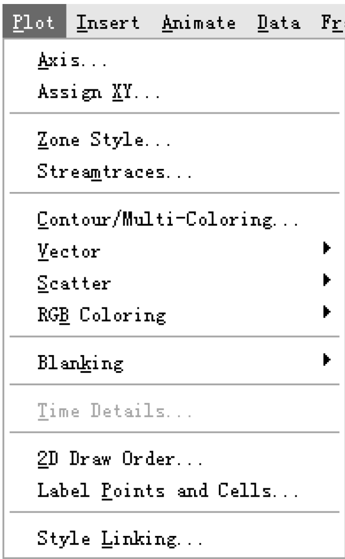


图 5-23　绘图菜单

Sreamtraces：用于对流线进行位置、大小、疏密等设置，如图 5-26 所示。

Vector：用于对矢量的长度，矢量箭头的一些设置及参考矢量的设定。

Style Linking：用于在框架之间及框架内部对一些基本参数的链接，便于在其他框架绘制图形时直接应用，如图 5-27 所示。

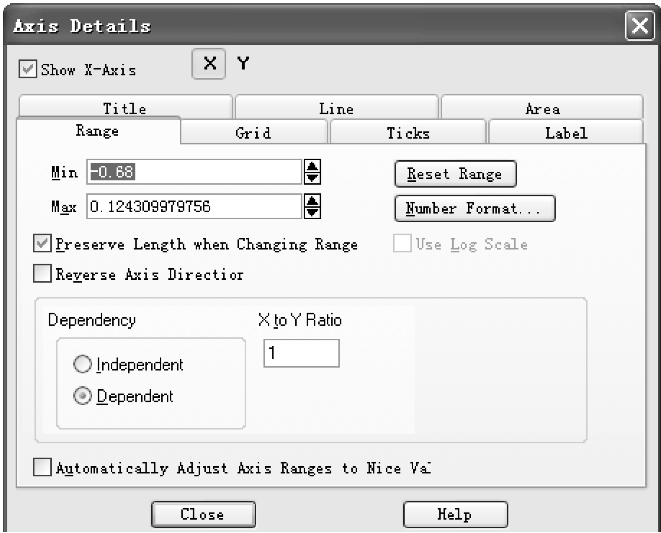


图 5-24　坐标轴设置

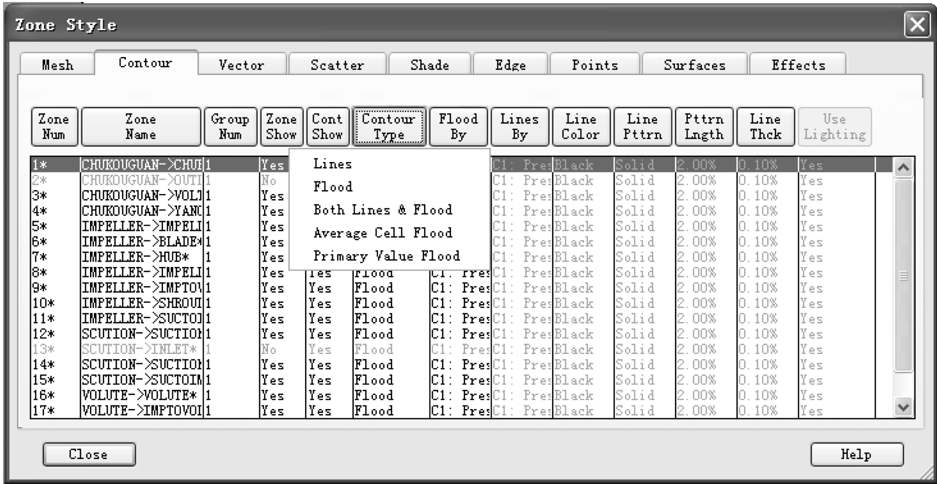


图 5-25　图域设置

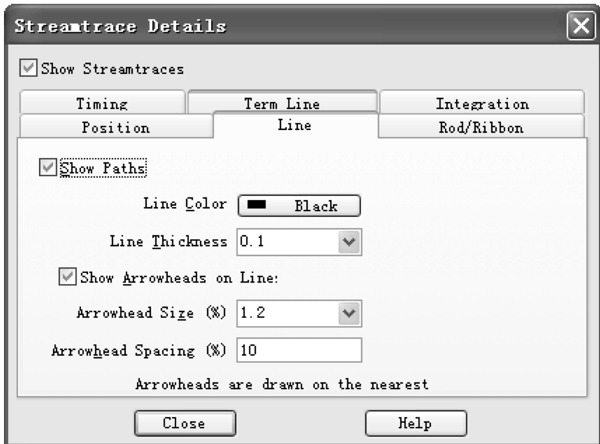


图 5-26　流线设置

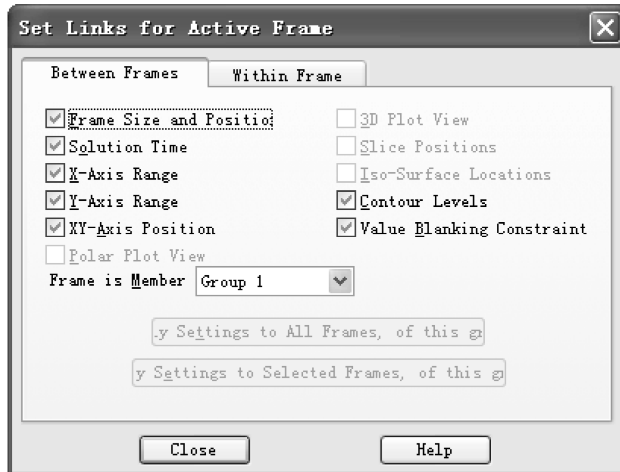


图 5-27　框架间设置链接

（5）插入菜单　插入菜单可用于控制文本、几何体（多线、圆、椭圆、正方形、矩形)、图片等功能，其中：

Text：用于在图形里插入文本框。

Image：用于在图形里插入外部图片。

Slice：用于对三维图形进行切片操作，从而获得二维图形。

Stream：用于插入流线。

（6）动画菜单　动画菜单可以对工作区内指定的平面、块、流线等进行相应的动画录制。

（7）数据菜单　数据菜单用于创建、操纵、检查数据。在 Tecplot 中可以进行的数据操作包括：创建图域、数据修改、删除、导出、插值以及三角测量数据。其中主要功能有：

Alter：它包括一些转换其原始数据的选项，其中：

Secify Equations：在弹出的对话框中，可以给当前的数据设置、建立、修改一些变量值。对话框主要分三个部分，顶部用来规定方程式，中间区域用来规定该修饰哪一个区域或索引范围，最后一部分是用来执行计算、关闭窗口、获得帮助的按钮域。

Smooth：可以把二维、三维图中的变量值修饰得平滑一些。

2D Rotate：可以对二维图的 X、Y 轴进行旋转。

Create Zone：它包括一些建立新图域或数据设置的选项，其中：

1D-Line：可以通过一个所规定点的数目和一个具体的范围来建立一个 I 序的图域。

Rectangular：可以用规定的尺寸来建立一个矩形图域。

Circular：可以用规定的尺寸和一个具体的网格点的数目来建立一个圆形图域。

Duplicate：用以建立一个已存图域的复制域。

Mirror：用于建立一个新的域作为已存图域的镜像。

Extract：主要包括一些从当前数据集中挑选数据的选项，其中：

FE-Boundary：用于抽取限定图域的边界线。

Slice from Plane：用以抽取一个三维图数据集的二维空间的片段。

Interpolate：包括对每个 Tecplot 图的插补方法的若干选项，其中：

Linear：借用线性内插法的对话框，可以用来把数据从一个或多个源图域插入到一个目标图域中去。

Triangulate：可利用弹出的对话框，从一个或多个任意图域中对数据点做任意测量，以建立一个新的限定元素的表面图域。

Spreadsheet：用于指定图域指定格式的数据。

Probe At：用于输入相应点的坐标可以把这个点在图形上面显示出来。

（8）框架菜单　框架菜单用于创建、编辑、控制帧。可以在屏幕上同时建立 128 个文本框，每个框内可包含一个绘图或草图，且可以对框架进行创建、编辑、删除、移动、激活等操作。文本框存储在框堆栈中，当前的文本框位于栈顶部。此菜单包括一些建立、删除、切换、更改文本框等选项，其中：

Create New Frame：用于建立一个新的文本框。

Edit Active Frame：可以精确地控制框架的大小、位置、格式等属性。

Delete Active Frame：删除当前的文本框。

Pop Active Frame：把当前框推到框堆栈的顶部

Push Active Frame：把当前框推到框堆栈的底部。

Fit all Frames to paper：修改所有的文本框以与当前纸的尺寸大小相匹配。

（9）选项菜单　选项菜单可用于对图形性能设定，图框样式、图纸进行相关设置，还能控制主功能界面左边工具条及工具栏的显示。

（10）脚本菜单　该菜单用于快速运用宏，可进行宏的编辑、定义和记录。

（11）工具菜单　该菜单可以进行有限元的后处理，高级别的快速编辑及基于时间序列的绘图功能。

（12）分析菜单　分析菜单可用于分析流动时流体特性、相关特性值的设定、进行非稳态设定等。

（13）帮助菜单　用于打开帮助文档。

5.3.2　工具栏

工具栏包括在菜单栏下的那部分工具栏和工作区左侧边框工具栏，这里的工具栏就是指菜单栏下的那部分工具栏。Tecplot 的工具栏可用于快速选择新建、打开及保存图文件，改变工作区内光标的形状，设定三维图形的旋转形式，快速编辑流线及云图，也可在图形上快速添加不同形状的文本框。

5.3.3　边框工具栏

打开 Tecplot 后，在屏幕的左端显示的是边框工具栏，在边框工具栏最上方的是一些工具栏选项，这些选项在作图、对图做效果处理时更显示出其方便性、快捷性。这里就简单介绍一下这些工具栏选项的基本功能。

Mesh：网格图域层用线连接数据点。

Contour：等值线图域层绘制等值线，可以是线或是线间的图域，或者两者都有。

Vector：绘制数值方向和大小。

Scatter：在每一个数据点绘制符号。

Shade：用指定的固体颜色对指定的图域进行着色，或者对三维图形添加光源。

Edege：用于指定图域的绘制边界。

边框工具栏半部分是进行快速编辑处理的选项，其中主要有：

Quick Edit：用于快速编辑，上一节已经介绍过。

Redraw All：用于重画全部帧，按住 Shift 键并单击该按钮会重新生成工作区。

Auto Redraw：会连续不断地自动更新图表。

在边框的最上端是帧模式的选项工具栏：3D Cartesian 表示是三维图，2D Cartesian 表示是二维图，XY Line 表示一维图，Polar line 表示是以极线的形式表示图形，可以根据需要观察其对应的一、二、三维图形，而 Sketch 则是不显示视图。

5.3.4　状态栏

状态栏位于 Tecplot 窗口底部，当光标移动到工具栏时会给出相应的帮助提示。

5.3.5　工作区

工作区如图 5-28 所示。绘图工作都是在该区域中完成，进行绘图操作时类似于窗口操作。通过一系列的数据处理，最终得到的图形结果就显示在工作区内。

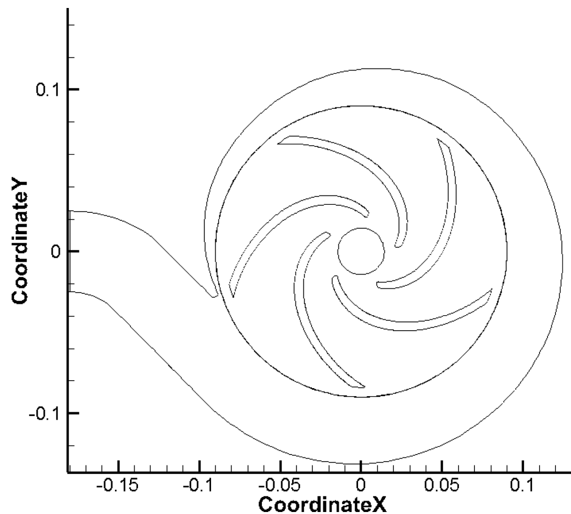


图 5-28　工作区

5.4　Tecplot 的实例应用

对于 ANSYS CFX 计算后的 res 格式的结果文件在导入 Tecplot 之前应存为 CGNS 格式，这样在软件启动后可在数据格式选取窗口中选中 CGNS 格式，然后按照如图 5-29 所示，从 1 到 4 按顺序单击即可导入数据文件。

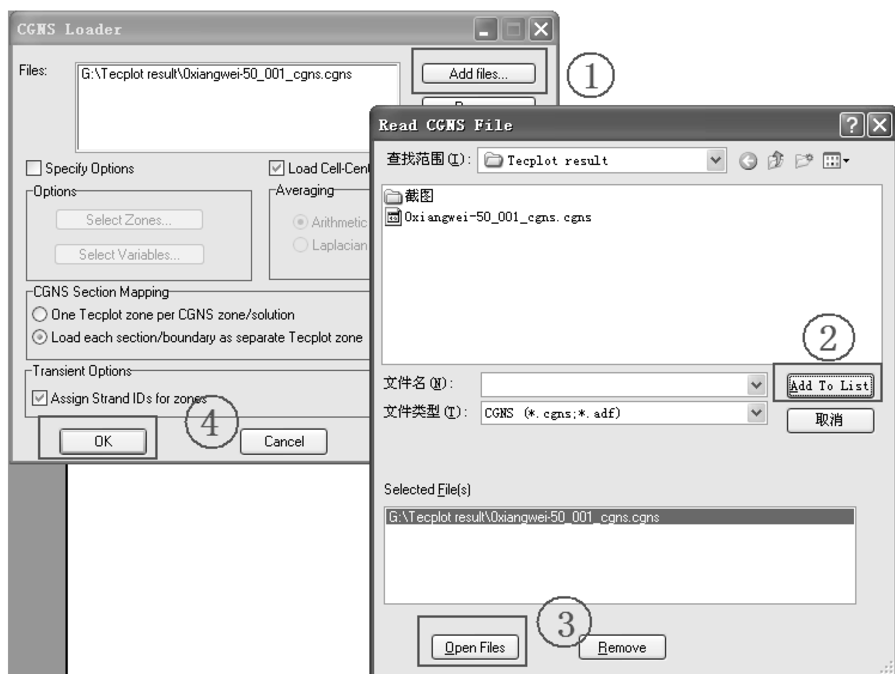


图 5-29　数据导入过程

本节将通过一些具体的离心泵实例来讲解 Tecplot 的使用方法，实例中数据均来自对模型泵的计算结果。

5.4.1　绘制矢量图

矢量图用于表示速度、作用力等的大小和方向。矢量图分二维矢量和三维矢量，分别对应于模型的二维流场计算和三维流场计算。在读入数据文件后，可以看到在单击边框工具栏最上端选项按钮时，出现有 3D Cartesian 和 2D Cartesian，在按钮的下方就有 Vector（矢量）选项，选上 Vector（矢量）复选框后就会自动弹出 Select Variables（选择变量）窗口，如图 5-30 所示。

图 5-30 即为三维矢量情况下的变量选择窗口，对应于 U、V、W 每个分量都可以选择诸如速度、压力、温度等变量值作为其对应的变量。在二维状态下，只有 U、V 两个分量。在这个窗口中设定每个矢量分量所对应的数据。设置完毕后，单击【OK】按钮，将自动显示在默认设置下的矢量图。

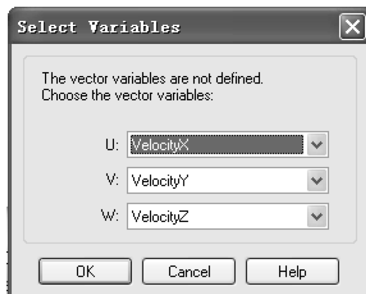


图 5-30　选择变量窗口

矢量图的显示方式也是可以调整的。下面将利用模型泵的二维图形对 Tecplot 的相关调整方法进行说明。首先在文件下拉菜单下选择 Load Data File（s）导入 ANSYS CFX 计算的模型泵的 CGNS 文件，默认导入的是模型泵的三维图形，提取出模型泵的中间平面作为二维矢量图的处理对象，在边框工具栏最上端选项按钮里选择 2D Cartesian，则显示

出默认设置下的二维图，如图 5-31 所示。

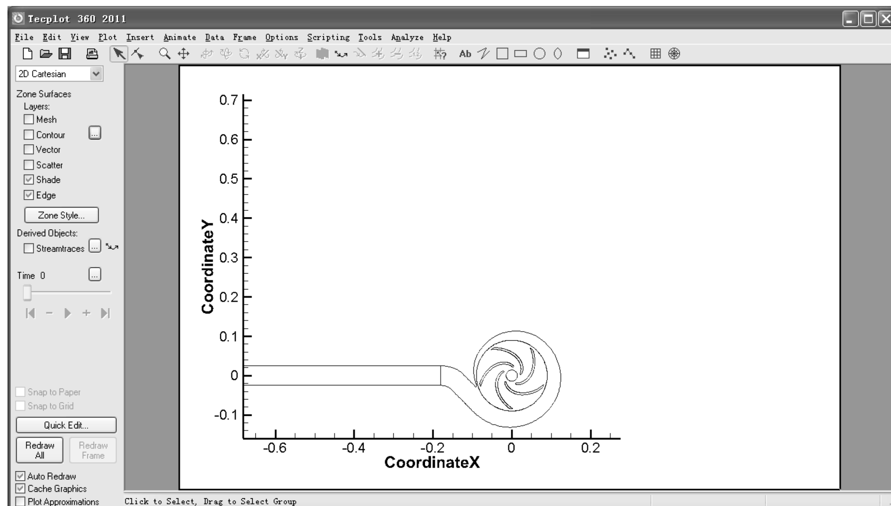


图 5-31　默认设置下的二维图

下面对矢量图进行绘制属性设定：

1）首先在绘图图域内通过鼠标调整获得我们所关心的包括叶轮和蜗壳的流动区域的二维图，按住鼠标中键往下或者右下方拖动光标即可放大二维图，往上或者左上方拖动光标即可缩小二维图，按住鼠标右键拖动光标即可在工作区内移动二维视图，调整后的结果如图 5-32 所示。

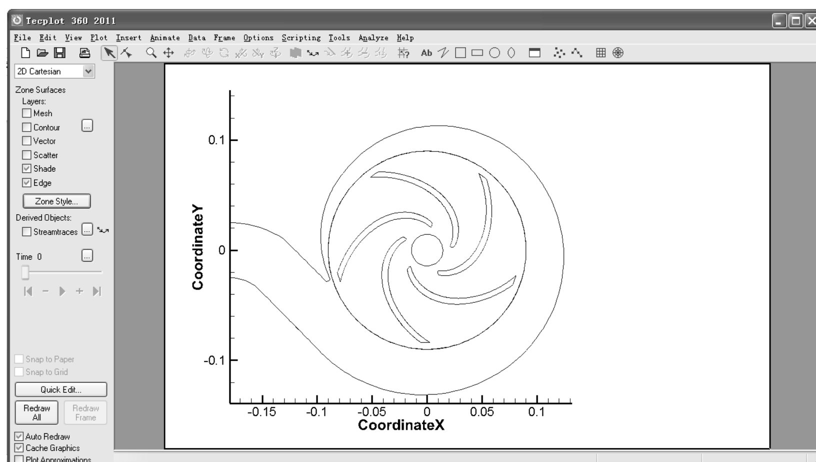


图 5-32　流体域二维图

2）在边框工具栏中选择 Vector（矢量），则在工作区中弹出 Select Variables（选择变量）窗口。在 U 右面的下拉列表中选择 Velocity X，V 右面的下拉列表中选择 Velocity Y，单击【OK】按钮完成坐标轴分量设置。

3）由于默认的矢量箭头颜色为黑色，不能直观反映出速度的大小，所以下面选择新的颜色为矢量着色。调整过程如图 5-33 所示，首先单击边框工具栏中的【Zone Style】（图域特性设置）按钮，打开图域特性设置窗口。然后在图域特性设置窗口下选择【Vector】（矢量）标签，选定对应二维图的图层。在所选定的图域二维图下，单击【Line color】（线颜色），在随即弹出的颜色选择窗口中选择【MultiColor】（多色），或其他单色，并确定颜色

将随哪个变量的值发生变化。最后调整矢量宽度为 0.3%，所得图形如图 5-34 所示。其他可以设置的参数包括矢量箭头的起点位置、长度、线型，箭头的形式（空心、实心或普通），是否激活矢量区，编辑矢量区的名称等。

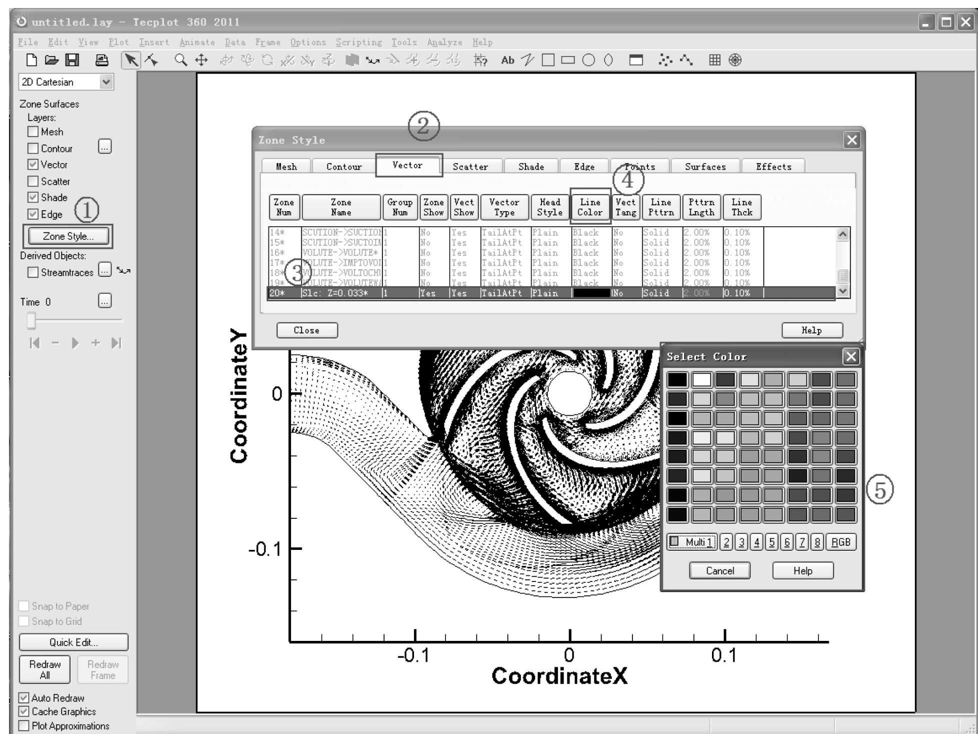


图 5-33　图域特性设置窗口

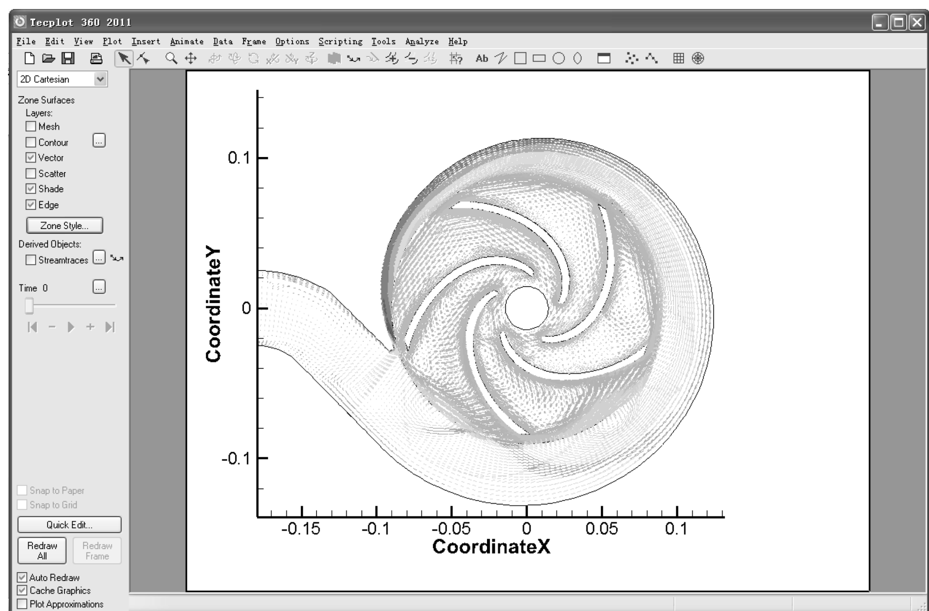


图 5-34　等值线矢量图

在矢量图中除了可以绘制等值线外还可以绘制流动迹线用以表征流体的流动。在边框工具栏中先选中【Streamtraces】复选框，单击迹线按钮，然后在绘图图域中单点一下鼠标便可以绘制出迹线图，如图 5-35 所示。

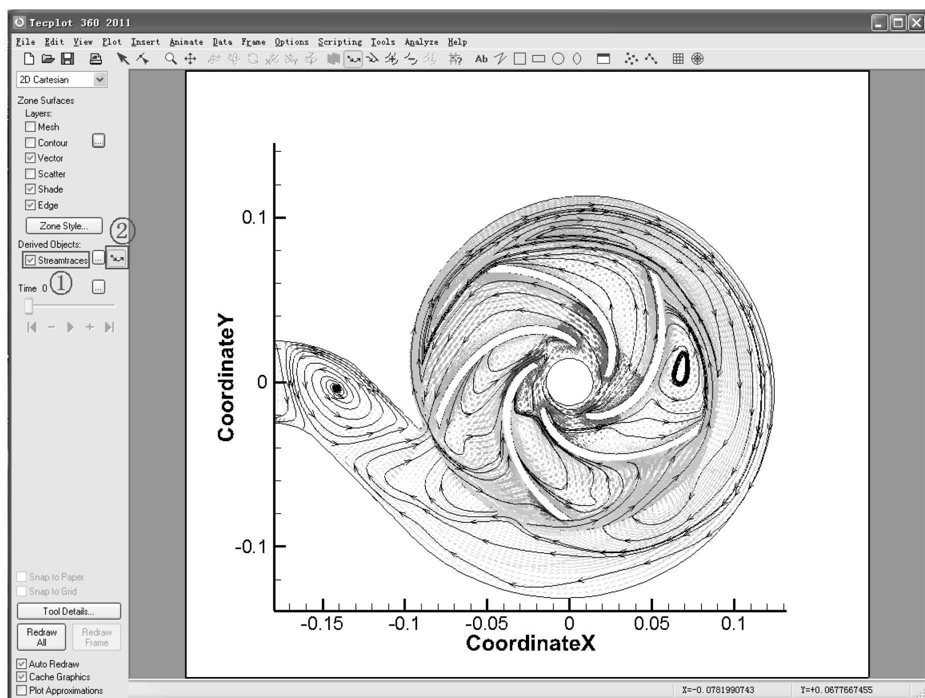


图 5-35　迹线图

5.4.2　绘制等值线图

等值线是用来观察流场变量变化的常用工具，通常不同数据大小用不同的色彩表示，能够获得较为直观的认识。绘制等值线一般包括五个步骤：

1）加载数据文件。

2）单击左侧工具栏中的【Contour】（等值线）选项，激活等值线图层。

3）选择目标变量，绘制等值线。

4）调整绘图参数，最终得到理想的等值线图。

5）保存图形文件。

为了保证叙述的连贯性，这里依然使用模型泵的计算文件来讲解绘制等值线的方法：

1）首先，如上一节，将模型泵的计算文件加载到系统中来，并将 3D Cartesian 调整成为 2D Cartesian，获得默认状态下的二维图形，如图 5-32 所示。

2）在边框工具栏中选择 Contour（等值线）复选框，在其右侧单击按钮，弹出来的等值线设置窗口，选择变量 Pressure（本书以压力为例，其他变量做法类似）如图 5-36 所示，然后单击【Close】按钮关闭选择框，就可以得到如图 5-37 所示的变量 Pressure 的等值线图。需要注意的是，在选定等值线变量后，还可以重新打开等值线设置窗口来重新选定激

活图域的等值线变量。

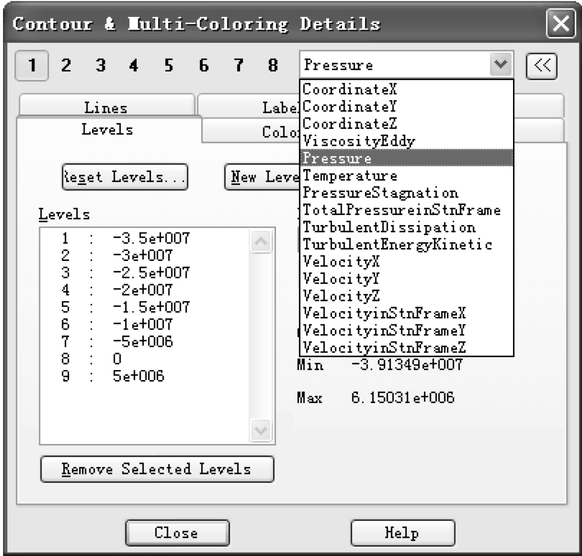


图 5-36　等值线设置窗口

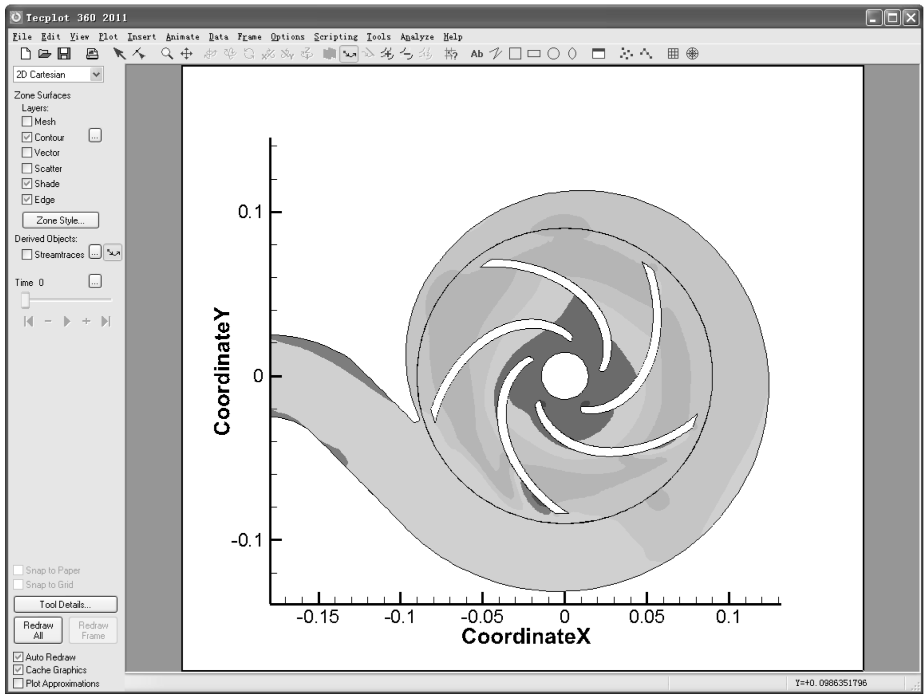


图 5-37　等值线图

3）调整等值线的密度和数值。在左侧工具栏中单击 ，弹出等值线设置窗口，在该窗口中单击【Levels】按钮将打开等值线的 Levels 设置窗口，如图 5-38 所示。

重新设定总的级数，单击【Reset Levels】（重置层级），并在弹出的输入栏中输入 9，

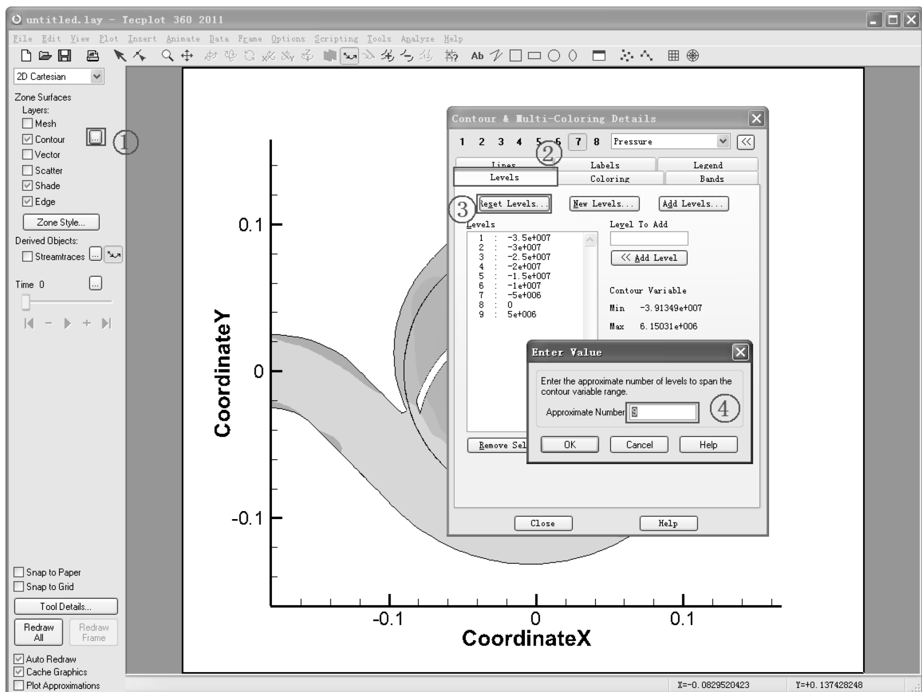


图 5-38　等值线 Levels 设置窗口

单击【OK】按钮完成设置。

调整等级密度，单击【New Levels】（新层级），选中【Min，Max and Number of Levels】（最小值、最大值和级数），然后在【Minimum Level】（最小层级）中输入 -35000000，在【Maximum Level】（最大层级）中输入 5000000（根据所处理模型大小自行设置，量程尽量与计算量程接近），如图 5-39 所示。在这里也可以在 Number of Levels（级数）中直接输入级数，进行等值线级数的调整。除了【Min，Max and Number of Levels】（最小值、最大值和级数）选项外，还可以选择【Min，Max and Delta】（最小值、最大值和级间增量）和【Exponential Distribution】（指数分布）。从三者的名称中可看出：【Min，Max and Number of Levels】（最小值、最大值和级数）是通过指定场变量的最小值、最大值和级数来定义等值线的；【Min，Max and Delta】（最小值、最大值和级间增量）是通过指定场变量的最小、最大值和级与级之间的数值增量来定义等值线的；而【Exponential Distribution】（指数分布）则用指数分布形式绘制等值线。

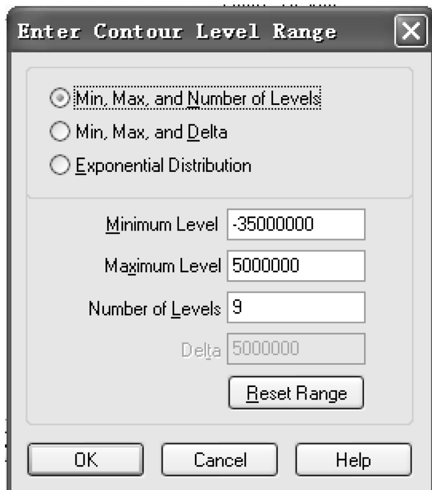


图 5-39　New Levels 设置窗口

加等值线的轮廓线。单击左侧工具栏的【Zone Style】（图域特性设置）按钮，在弹出的对话框中单击【Contour】（等值线绘图），单击【Contour Type】对当前图形选择 Both Lines & Flood（画线并填充），如图 5-

40 所示。等值线图形中有了轮廓线后，通过图 5-40 中【Contour】下面的一些按钮可以调整轮廓线的线型、颜色和宽度等参数，以达到最佳的显示效果。生成的图形如图 5-41 所示。

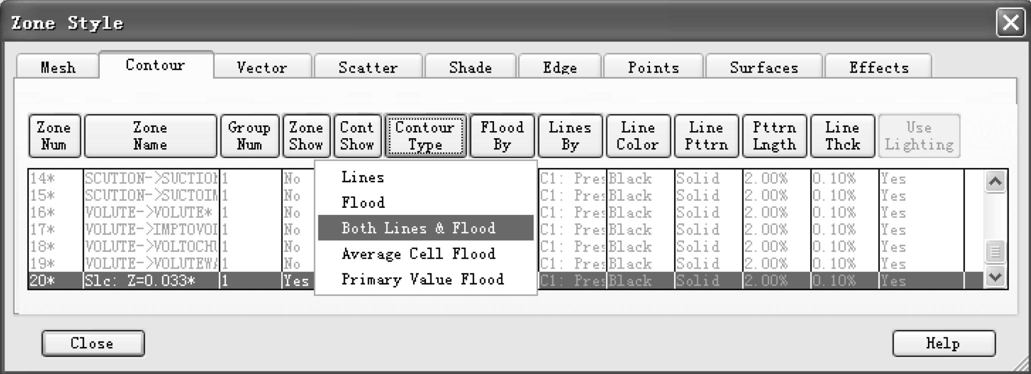


图 5-40　等值线的轮廓线设置窗口

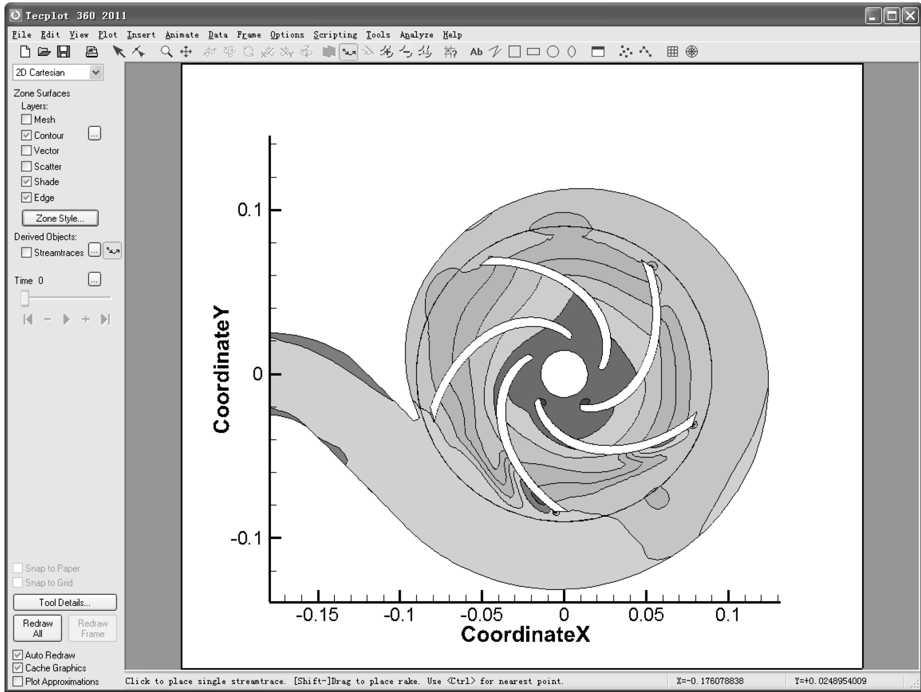


图 5-41　等值线的轮廓线图

加上图例并在轮廓线上标值。在左侧工具栏中单击 [...]，弹出等值线设置窗口，在该窗口中单击【Legend】按钮，打开等值线的图例设置窗口，如图 5-42 所示。执行下列操作，在【Legend】窗口中首先选中 Show Contour Legend（显示等值线图例）；然后对【Alignment】选择 Vertical（垂直对齐）；在【Text】组合框中调整文本颜色（Color）、字体（Font）、尺寸（Size）和格式（Format）；通过【Legend Box】（边框设置）决定是否为图例加边框，并确定边框的颜色【Box Color】、线型宽度【Line Thickness】和间距【Margin】。调整后的窗口应如图 5-43 所示。

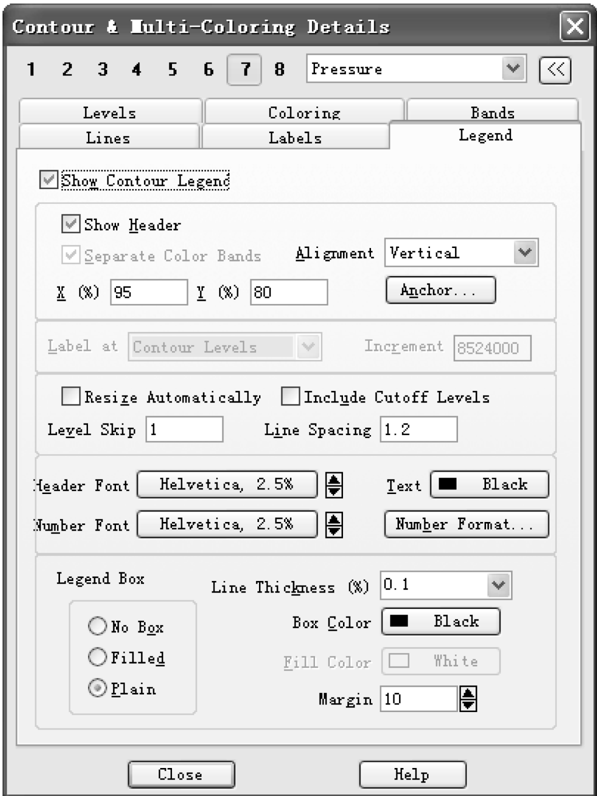


图 5-42　图例设置窗口

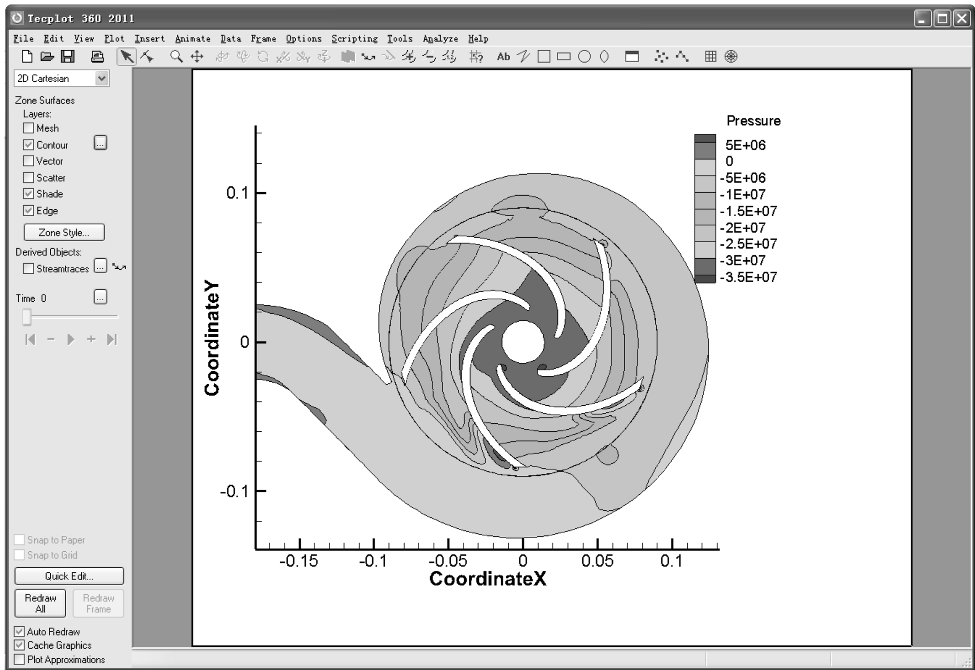


图 5-43　等值线及其图例

在等值线设置窗口中单击【Label】按钮，打开等值线的数据添加窗口，如图 5-44 所示。执行下列操作，在【Label】窗口中首先选中【Show Label】（显示数值）；然后在【Fill】组合框中调整背景和文本颜色【Color】、字体【Font】和背景，这样将以数值的形式显示当地流场变量的数值，调整后的窗口应如图 5-45 所示。

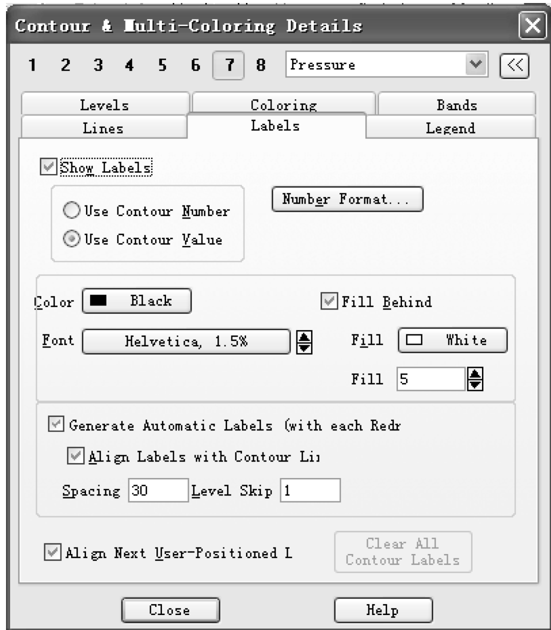


图 5-44　等值线的数据添加窗口

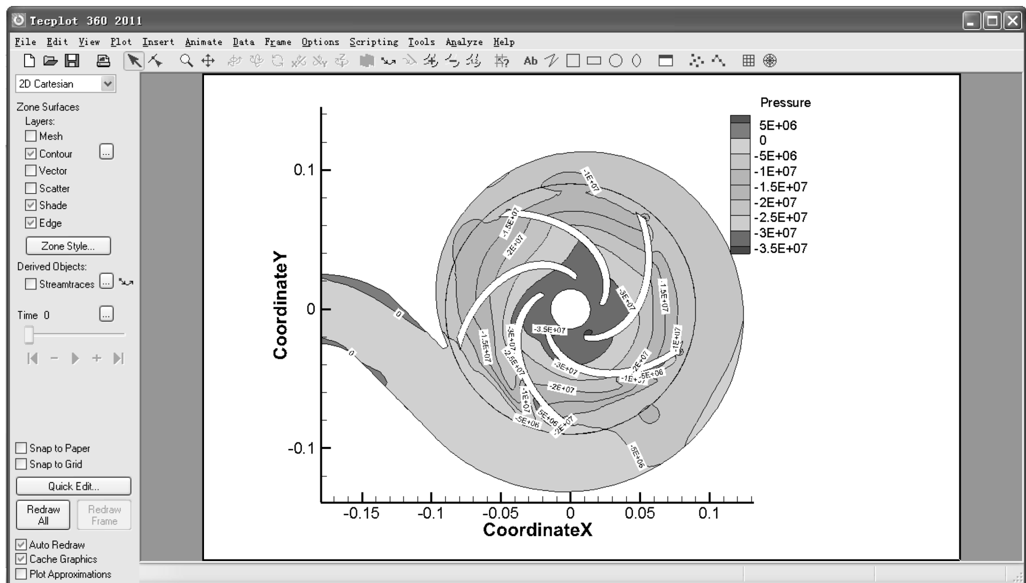


图 5-45　等值线及其数值标注

参考文献

［1］陶文铨．计算传热学的近代进展［M］．北京：科学出版社，2000.

［2］郭鹏程，罗兴锜，刘胜柱．离心泵内叶轮与蜗壳间耦合流动的三维紊流数值模拟［J］．农业工程学报，2005，21（8）：2-5.

［3］Lohner R. A parallel advancing front grid generation scheme［M］. ALAA，2000.

［4］Lo S H. Volume discretization into tetrahedral Ⅱ：3D Triangulation by advancing front approach［J］. Computers and Structures，1991，39（5）：501-511.

［5］Lohner R，Parikh P，Gumbert C. Interactive generation of unstructured grid for three dimensional problems［J］. Numerical Grid Generation in Computational Fluid Mechanics，1988，88：687-697.

［6］Watson D. Computing the n-dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoi polytopes［J］. The Computer Journal，1981，24（2）：167-172.

［7］Frey P J，Loic M. Fast adaptive quad tree mesh generation［C］. Proceedings of the 7th International Meshing Roundtable，Dearborn，1998，211-224.

［8］M A Yerry，M S Shephard. A modified quad tree approach to finite element mesh generation［J］. IEEE Computer Graphics and Applications，1983，39-46.

［9］Kikuchi，Noboru. Adaptive grid-design methods for finite element analysis［J］. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering，1986，55：129-160.

［10］Rebay s. Efficient unstructured mesh generation by means of Delaunay triangulation and Bowyer-Watson algorithm［J］. Journal of Coomputational physics，1993，106-125.

［11］Pascal J，Houman Borouchaki. 3D Delaunay mesh generation coupled with an advancing-front approach［J］. Computer method in applied mechanics and engineering，1998，115-131.

［12］刘学强，伍贻兆，夏健．用混合网格求解三维可压雷诺平均 N-S 方程［J］．计算力学学报，2002，19（3）：24-27.

［13］Weatherill N P. Mixed structured-unstructured meshes for aerodynamic flow simulation［J］. The Aeronauti，1990，94：111-123.

［14］Yao Zheng，Meng-Sing. Three-dimensional dragon grid methodology for computational fluid dynamics［J］. Computational fluid dynamics journal，2002，10（4）：585-591.

［15］张素平，张涵信．矩形/非结构化网格技术在二维/三维复杂无粘流场数值模拟中的应用［J］．空气动力学学报，1998，16（1）：79-88.

［16］陶文铨．数值传热学［M］．2 版．西安：西安交通大学出版社，2004.

［17］康宁．粘性流体换热问题用直角坐标网格的贴体解法［J］．北京航空航天大学学报，2004，9（30）：876-881.

［18］Brown P R. A interactive method for the automatic generation of finite element meshes using the Schwarz-Christoffel transformation［J］. Computer methods in applied mechanics and engineering，1981，25（1）：101-126.

［19］Thompson J F，Thames F C，Mastin C W. Automtic numerical generation of body fitted curvilinear coordinate system for field containing any number of arbitrary two dimensional bodies［J］. ComputPhys，1974，（15）：299-319.

［20］赵斌娟，袁寿其，刘厚林，等．双流道泵叶轮内贴体网格生成与 CFD 分析［J］．排灌机械，2008，26（2）：10-14.

[21] Steger J L, Chaussee D S. Generation of body-fitted coordinates using hyperbolic partial differential equations [M]. SIAM JSciStat Comp, 1980.
[22] Nakamura S. Marching grid generation using parabolic partial differential equations [J]. Numerical grid Generation, 1982, 79-105.
[23] 王春发，陈国华，杨万里．复杂组合气道三维分块结构化贴体网格的生成 [J]. 华中科技大学学报：自然科学版，2004，32 (3)：14-16.
[24] 阎超，禹建军，李君哲．热流 CFD 计算中格式和网格效应若干问题研究 [J]. 空气动力学报，2006，24 (1)：125-130.
[25] D F RoGers , J A ADAMS. Mathenatical Elements for Computer Graghics [M]. Mc Graw-Hill Higher Education, 1989.
[26] Houman Borouchaki, Patrick Laug and Paul-Louis George. Parametric surface meshing using a combined advancing-front generalized Delaunay approach [J]. International journal for numerical methods in engineering, 2000, 49: 233-259.
[27] 张潇，王延荣，张小伟，等．基于多层动网格技术的流固耦合方法研究 [J]. 船舶工程，2009，31 (1)：64-66.
[28] 张志荣，冉景煜，张力，等．内燃机缸内气体 CFD 瞬态分析中动态网格划分技术[J]. 重庆大学学报：自然科学版，2005，28 (11)：97-100.
[29] 夏健，田书玲，王江峰，等．三维动态非结构重叠 Navier-Stokes 方程并行算法 [J]. 航空学报，2008，(1)：53-57.
[30] 田书玲，伍贻兆，夏健．用动态非结构重叠网格法模拟三维多体相对运动绕流 [J]. 航空学报，2007，28 (1)：46-52.
[31] 郭成昊，刘凤玉．自适应网格计算模型与分析 [J]. 计算机工程，2008，34 (8)：41-46.
[32] 赵会军，吕丹丹．用自适应网格法计算管道的水力瞬变 [J]. 油气储运，2008，27 (5)：24-27.
[33] Chen C J, Jaw S Y. Fundamentals of turbulence modeling. Washington DC: Taylor &Francis, 1998.
[34] 陶文铨．数值传热学 [M]. 西安：西安交通大学出版社，2001.
[35] 王福军．计算流体动力学分析-CFD 软件原理与应用 [M]. 北京：清华大学出版社，2004.
[36] 林建忠，阮晓东，陈邦国，等．流体力学 [M]. 北京：清华大学出版社，2005.
[37] 朱自强．应用计算流体力学 [M]. 北京：北京航空航天大学出版社，1998.
[38] 张兆顺，崔桂香，许春晓．湍流理论与模拟 [M]. 北京：清华大学出版社，2005.
[39] 熊鳌魁．湍流模式理论综述 [J]. 武汉理工大学学报，2001，25 (4)：451-455.
[40] Wilcox D C. Turbulence Modeling for CFD [M]. 2nd ed La Canada: DCW Industries, 1993.
[41] 陈晓春，王元．零方程模型用于空调通风房间气流组织数值模拟的研究 [J]. 暖通空调，2006，36 (8)：19-24.
[42] 王刚，廉月明，胡松涛，等．零方程模型在大空间建筑热环境模拟中的应用 [J]. 建筑热能通风空调，2003，2：1-3.
[43] 赵彬，李先庭，彦启森．用零方程湍流模型模拟通风空调室内的空气流动 [J]. 清华大学学报：自然科学版，2001，41 (10)：109-113.
[44] 吴玉林，刘树红，钱忠东．水力机械计算流体动力学 [M]. 北京：中国水利水电出版社，2007.
[45] 陈景仁．湍流模型及有限分析法 [M]. 上海：上海交通大学出版社，1989.
[46] Cebeci T, Smith A M. Analysis of Turbulent Boundary Layers [M]. New York: Academic Press, 1974.
[47] Bladwin B S, Lomax H. Thin Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows [M]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1978. AIAA Paper 78-257, 1978.
[48] 蒋胜矩．基于 N-S 方程的大迎角分离流及翼型结冰数值模拟 [D]. 西安：西北工业大学，2004.

[49] 肖志祥 . 复杂流动 Navier-Stokes 方程数值模拟及湍流模型应用研究 [D]. 西安：西北工业大学，2003.
[50] 李杰 . Navier-Stokes 方程数值模拟及湍流模型研究 [D]. 西安：西北工业大学，2006.
[51] 李广宁 . 三维 N-S 方程数值求解及 S-A 湍流模型应用研究 [D]. 西安：西北工业大学，2006.
[52] Johnson D A，King L S. A Mathematical Simple Turbulence Closure Model for Attached and Separated Turbulent Boundary Layers. AIAA Journal，1985，23：1684-1692.
[53] Abid R，Vatsa V N，Johnson D A，et al. Prediction of Separated Transonic Wing Flows with Nonequilibrium Algebraic Turbulence Model. AIAA Journal，1990，28 (8)：1426-1431.
[54] Johnson D A，Coakley T J. Improvements to a Nonequilibrium Algebraic Turbulence Model. AIAA Journal，1990，28 (11)：2000-2003.
[55] Johnson D A. Nonequilibrium Algebraic Turbulence Modeling Considerations for Transonic Airfoils and Wings. AIAA Paper 92-0026，1992.
[56] 肖志祥，李凤蔚 . 三种湍流模型模拟能力的对比 [J]. 西北工业大学学报，2002，20 (3)：351-355.
[57] Spalart P R，lmaras S R. A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows [J]. Recherche Aerospatiale，1994，1：5-21.
[58] Spalart P R，lmaras S R. A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows [J]. AIAA-92-0439，1992.
[59] 马威，王丹华，陆利蓬 . 提高 Spalart-Allmaras 湍流模型对分离模拟能力的研究 [J]. 航空动力学报，2008，23 (8)：1474-1479.
[60] 王兰 . 超燃冲压发动机整机非结构网格并行数值模拟研究 [D]. 中国空气动力研究与发展中心研究生部，2007.
[61] 黄冬梅 . 某型号制导航弹气动外形设计及机弹分离气动特性研究 [D]. 杭州：浙江大学，2006.
[62] 宁方飞，徐力平 . Spalart-Allmaras 湍流模型在内流流场数值模拟中的应用 [J]. 工程热物理学报，2001，22 (3)：304-306.
[63] 郑健，周长省，鞠玉涛，等 . Spalart-Allmaras 湍流模型在弧形翼超音速流场数值模拟中的应用 [J]. 重庆工学院学报，2008，22 (12)：34-39.
[64] Baldwin B S，Barth T J. A One-Equation Turbulence Transport Model for High Reynolds Number Wall-Bounded Flows [R]. NASA Technical Memorandum 102847，1990.
[65] 刘洁 . 微型飞行器机翼三维非定常流场的数值研究和气动优化 [D]. 上海：上海大学，2008.
[66] 成娟，黄明恪 . 非结构网格上的 B-B 单方程模型湍流计算 [J]. 计算物理，2003，20 (3)：273-278.
[67] Launder B E，Spalding D B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press，London，1972.
[68] 辛喆 . 混流式水轮机全部通流元件的三维湍流流场分析与性能预测 [D]. 北京：中国农业大学，2005.
[69] 张兆顺 . 湍流 [M]. 北京：国防工业出版社，2009.
[70] Yakhot V，Orszag S A. Renormalization group analysis of turbulence – I. Basic theory [J]. Journal of Scientific Computing，1986，1 (1)：1-51.
[71] Smith L M，Reynolds W C. On the Yakhot-Orszag Renormalization Group Method for Deriving Turbulence Statistics and Models. Physics of Fluid A，1992，4 (4)：364-390.
[72] 高红 . 溢流阀阀口气穴与气穴噪声的研究 [D]. 杭州：浙江大学，2003.
[73] Shih T H，Liou W W，Shabbir A et al. A New k-ε Eddy Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows [J]. Computers Fluids，1995，24 (3)：227-238.
[74] 黄维菊 . 旋转横流膜微滤压力场及流动数值模拟研究 [D]. 成都：四川大学，2003.

［75］Jones W P，Launder B E. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. Int J Heat Mass Transfer. 1972，15：301-311.

［76］Jones W P，Launder B E. The calculation of low-Reynolds-number phenomena with a two-equation model of turbulence. Int J Heat Mass Transfer，1973，16：1119-1130.

［77］Wilcox D C. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. ［J］. AIAA Journal，1988，26（11）：1299-1310.

［78］David C. Wilcox. Turbulence modeling for CFD［M］. DCW Industries Inc，1993.

［79］马小亮，杨国伟．湍流模型计算比较研究［C］. 第十三届全国激波与激波管会议论文集，396-401.

［80］陈钱．叶轮机械相关流动中几种湍流模型的预测性能［D］. 北京：清华大学，2007.

［81］Menter F R. Improved Two-Equation k-ω Turbulence Models for Aerodynamic Flows. NASA Technical Memorandum 103975，1992.

［82］Menter F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications［J］. AIAA Journal，1994，32（8）：1598-1605.

［83］Menter F R. Zonal two-equation k-ω turbulence model for aerodynamic flows. AIAA Paper 1993-2906，1993.

［84］Menter F R，Kuntz M，Langtry R. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model. Turbulence，Heat and Mass Transfer 4，2003.

［85］张庆麟．风力机叶片三维气动性能的数值研究［D］. 北京：清华大学，2007.

［86］Coakley T J. Turbulence modeling methods for compressible Navier-Stokes equations. AIAA Paper，1983，1683-1693.

［87］李人宪．有限体积法基础［M］. 2 版．北京：国防工业出版社，2008.

［88］王福军．计算流体动力学分析［M］. 北京：清华大学出版社，2004.

［89］孙宝成．燃气轮机燃料/空气掺混规律的数值研究［D］. 北京：清华大学，2007.

［90］傅德薰，马延文．计算流体力学［M］. 北京：高等教育出版社，2002.

［91］Patanker S V，Spalding D B. A calculation processure for heat，mass and momentum transferin three-dimensional parabolic flows. Int J Heat Mass Transfer，1972，15：1787-1806.

［92］Patankar S V. Numerical heat transfer and fluid flow［M］. New York：McGraw-Hill，1980，131-134.

［93］Comini G，Del Giudices S A. A k-ε model of turbulent flow［J］. Numer Heat Transfer，1985，8：133-147.

［94］Hsu C. A curvilinear-coordinate method for momentum，heat and mass transfer of irregular geometry［D］. Twin Cities：University of Minnesota，1981.

［95］Prakash C. A finite element method predicting flow through ducts with arbitrary cross section［D］. Twin Cities：University of Minnesota，1981.

［96］Rhie C M. A numerical study of the flow past an isolated airfoil with separation［D］. Champaign：University of Illinois，Urbana-Champaign，1981.

［97］Peric M，Ferziger J H. Computational methods for fluid dynamics［M］. 3rd ed New York：Springer Verlag，2002.

［98］Majumdar S. Role of underrelaxation in momentum interpolation for calculation of flow with nonstaggered grids［J］. Numerical Heat Transfer，1988，13（1）：125-132.

［99］Miller T F，Schmidt F W. Use of a pressure-weighted interpolation method for the solution of the incompressible navier-stokes equations on a non-staggered grid system［J］. Numerical Heat Transfer，1988，14（2）：213-233.

［100］Kobaashi M H，Pereira J C F. Numerical comparison of momentum interpolation methods and pressure-velocity algorithm using non-staggered grids. Communications in Applied Numerical Methods，1991，7（3）：173-186.

[101] Nie J H, Li Z Y, Wang Q W, Tao W Q. A method for viscous incompressible flows with a simplified collocated grid system [C]. In: P Cheng K F Ceng, eds. Proceedings of the Energy Engineering in 21st Century. New York: Begell House, 2000, 1: 177-183.

[102] Date A W. Fluid dynamical view of pressure checkerboarding problem and smoothing pressure correction on meshes with collocated variables [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46: 4885-4898.

[103] 陶文铨. 计算传热学的近代发展 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.

[104] 徐明海, 陶文铨. 一种求解不可压 N-S 方程的非结构化网格方法 [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39 (1): 83-86.

[105] 向小华, 苏长城, 王船海, 等. GAMMA 格式及 DATE 方法在 SIMPLE 算法中的应用 [J]. 河海大学学报, 2008, 36 (4): 471-474.



地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
服务咨询热线：010-88361066
读者购书热线：010-68326294
010-88379203
网络服务
机工官网：www.cmpbook.com
机工官博：weibo.com/cmp1952
金书网：www.golden-book.com
教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版



机械工业出版社微信公众号

上架指导 通用机械

ISBN 978-7-111-49673-1
策划编辑◎王春雨 / 封面设计◎陈沛



定价：58.00元